

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЛАЗЕРНЫЕ, ПЛАЗМЕННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ  
ЛАПЛАЗ-2024»**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Москва

УДК:001.89:[621.373.826+533.9+539.2+621.384+530.1+531.761](06)378.014

ББК:22.31:72

М 43

X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2024»: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2024. – 464 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу IX Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2023», которая пройдет с 26 по 29 марта 2024 года в смешанном формате. Организатором конференции выступает Институт лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ.

Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: лазерная физика и лазерные технологии; физика плазмы и плазменные технологии; сверхсильные лазерные поля; управляемый термоядерный синтез; современные проблемы теоретической физики; современные проблемы физики твердого тела, функциональных материалов и наносистем; ускорители заряженных частиц и радиационные технологии; современные проблемы квантовой метрологии, физика высокой плотности и энергии, электрофизическое и ядерное приборостроение, синхротронные и нейтронные методы исследования новых материалов, проектная деятельность, математическое моделирование, современные образовательные технологии, виртуальные тренажеры.

Статьи получены до 12 марта 2024 года. Материалы издаются в авторской редакции.

Ответственный редактор: Крупышева Полина Олеговна

ISBN 978-5-7262-3051-1

© Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2024

---

Подписано в печать: 29.03.2024.

Формат 210×297 1/16.

Изд. №008-2.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

115409, Москва, Каширское шоссе, 31

## Программный комитет конференции

**Гаранин Сергей Григорьевич** – академик РАН, директор Института лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ - председатель Программного комитета

**Кузнецов Андрей Петрович** – д.ф.-м.н., директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ – зам. председателя Программного комитета

**Бармаков Юрий Николаевич** – д.т.н., первый заместитель научного руководителя ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, научный руководитель Института физико-технических интеллектуальных систем НИЯУ МИФИ, профессор НИЯУ МИФИ

**Гарнов Сергей Владимирович** – член-корр. РАН, директор Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН, научный руководитель Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ

**Губин Сергей Александрович** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой химической физики НИЯУ МИФИ

**Евтихий Николай Николаевич** – генеральный директор ООО «НТО «ИРЭ-ПОЛЮС», заведующий кафедрой лазерной физики НИЯУ МИФИ

**Колачевский Николай Николаевич** – член-корр. РАН, директор Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

**Кудряшов Николай Алексеевич** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики НИЯУ МИФИ

**Менушенков Алексей Павлович** – д.ф.-м.н., профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ НИЯУ МИФИ

**Полозов Сергей Маркович** – д. ф.-м. н, заведующий кафедрой электрофизических установок НИЯУ МИФИ

**Попруженко Сергей Васильевич** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой теоретической ядерной физики НИЯУ МИФИ

**Фертман Александр Давидович** – к.ф.-м.н, директор по науке, технологиям и образованию Фонда «Сколково»

**Черковец Владимир Евгеньевич** – д.ф.-м.н., профессор, научный руководитель АО ГНЦ «ТРИНИТИ»

## Организационный комитет конференции

**Кузнецов А.П.** – директор Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, председатель Организационного комитета

**Генисаретская С.В.** – заместитель директора Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, заместитель председателя Организационного комитета

**Борисюк П.В.** – заведующий кафедрой физико-технических проблем метрологии

**Воронова Н.С.** – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Гаспарян Ю.М.** — доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Городничев Е.Е.** – профессор отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Губский К.Л.** – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Гусарова М.А.** – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Кузнецов А.В.** – доцент отделения лазерных и плазменных технологий офиса образовательных программ

**Маклашова И.В.** — начальник отдела организационного планирования и международного сотрудничества

**Масленников С.П.** – профессор кафедры прикладной ядерной физики

**Рябов П.Н.** – заместитель директора Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ, доцент кафедры прикладной математики

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	4
Секция ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....	31
Е. АБЫЗОВА, И. ПЕТРОВ, И. БРИЛЬ, Д. ЧЕШЕВ, А. ИВАНОВ, М. ХОМЕНКО, А. АВЕРКИЕВ, М. ФАТКУЛЛИН, Д. КОГОЛЕВ, Е. БОЛЬБАСОВ, А. МАТКОВИЧ, Дж. ЧЕН, Р. РОДРИГЕС, Е. ШЕРЕМЕТ_ ЛАЗЕРНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА В ПОЛИМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ .....	32
Е.И. МЕЗЕНИН, В.А. СТЕПАНОВ_ВЛИЯНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СТАЦИОНАРНОЙ СВЧ ПЛАЗМЫ НА СТРУКТУРУ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК33	
С.Е. МИНАЕВ, Д.И. АШИХМИН, Ю.К. СЕДОВА, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ_ ЛАЗЕРНАЯ БИОПЕЧАТЬ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	34
А.В. БАЛАШОВ, А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЁВ, А.Ю. КОЗЛОВ, О.А. РУЛЕВ, Д.В. СИНИЦЫН, А.В. ШУТОВ_ ТЕА СО <sub>2</sub> ЛАЗЕР С УФ ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ .....	35
А.А. БУБНОВ, К.В. ФРОЛОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО_ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ФОТОНАГРЕВ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ЗАГРУЖЕННОГО ЭКЗОГЕННЫМ КРАСИТЕЛЕМ МЕТИЛЕНОВЫМ СИНИМ, ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ .....	36
А.В.ЛОБАНОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, А.П. МЕЛЕХОВ, М.С. ДУДАЛИН, К.И. ВОЛКОВ, Д.Е. РАДЫГИН, А.П. КУЗНЕЦОВ_ ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР И СИСТЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА “ЭЛЬФ” .....	38
Л.П. ВЫЛОМОВ, О.И. ГОРЧАКОВ, А.Е. ДАНИЛОВ, Л.А. ДУШИНА, А.Е. ПЛОХОТНИК, К.В. СТАРОДУБЦЕВ_ СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАССЕЯННОГО МИШЕНЬЮ ИЗ МАЛОПЛОТНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	39
К.А. ГАЛЮК, Б.Д. ОВЧАРЕНКО, А.А. УШАКОВ, В.В. БУКИН_ МОДЕЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА Nd <sup>3+</sup> :YAG .....	40
Н.В. ГРЕЧИХИН, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.Р. БУРХАНОВ_ ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ ПЕРКУССИОННЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СВЕРЛЕНИЕМ .....	41
Я.В. ГРУДЦЫН, А.В. КОРИБУТ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, В.И. КОВАЛЕВ, А.А. ИОНИН_ ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КАРБОНАТЕ КАЛЬЦИЯ С ЗАТРАВКОЙ УЗКОПОЛОСНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ ND:YAG ЛАЗЕРОМ.....	42
Г.Н. ДУБРОВИН, П.Е. САМАРИН_ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ГИДРОРЕЗКИ.....	43
М.С. ДУДАЛИН, В.В. КРАВЧЕНКО, К.И. ВОЛКОВ, Г.А. КАЗАРЦЕВ, А.П. КУЗНЕЦОВ_ РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСА ЭЛЬФ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА EPICS .....	44
О.И. ГОРЧАКОВ, Л.А. ДУШИНА, Д.С. КОРНИЕНКО, А.Г. КРАВЧЕНКО, В.В. МИСЬКО, К.В. СТАРОДУБЦЕВ, В.М. ТАРАКАНОВ_ МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЫ И ПРОФИЛЯ ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	45

Е.С. ЕРМИЛОВА, И.Р. ОВСЯНКИН, А.А. ГАВРИКОВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ_ФОРМИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЭЛОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ.....	46
Д.Н. ИГНАТЕНКО, А.В. ШКИРИН, М.Е. АСТАШЕВ, С.Н. ЧИРИКОВ, С.В. ГУДКОВ_ЛАЗЕРНЫЙ СКАТТЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СОДЕРЖАНИЯ ЖИРА И СОМАТИЧЕСКИХ КЛЕТОК В МОЛОКЕ ДЛЯ ДОИЛЬНЫХ СИСТЕМ .....	47
И.О. КИНЯЕВСКИЙ, А.В. КОРИБУТ, Я.В. ГРУДЦЫН, М.В. ИОНИН_ГЕНЕРАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 5,5 ДО 9,5 МКМ ПУТЕМ ГЕНЕРАЦИИ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ AgGaS <sub>2</sub> .....	48
Н.М. КОЛЕСНИКОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, К.С. ЛУКЪЯНОВ, М.Т. СЕМКИВ, И.Ю. ТИЩЕНКО ВОЛОКОННЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ КОАКСИАЛЬНОГО АИПД .....	49
П.С. КУЛЕШОВ_АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЕ НАНОРЕЛЬЕФНОЕ ПОКРЫТИЕ И ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ.....	50
З.С. МАРКОВ, С.В. КИРЕЕВ, Н.А. МАРШИН, А.А. КОНДРАШОВ_ПОСТРОЕНИЕ СОГЛАСОВАННОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СЕРОВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДА TDLAS.....	51
С.В. КИРЕЕВ, Н.А. МАРШИН, З.С. МАРКОВ, А.А. КОНДРАШОВ_ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ДИОДНО- ЛАЗЕРНОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ДИАПАЗОНЕ 4860 – 4880 СМ <sup>-1</sup> .....	52
М. А. МИХАЛЕВИЧ, Е. А. ДАВЫДОВА, И. А. ФИЛАТОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ НА СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЮРАЛЮМИНИЯ .....	53
А.А. МОРОЗОВА, У.А. КАПУСТИНА, Г.В. РОМАНОВА_ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЮВЕЛИРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	54
М.А. МУРЗАКОВ, Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Н.В. ГРЕЗЕВ, Д.М. КАТАЕВ, А.С. ЩЕКИН_ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА НА ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗОНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОЗРАЧНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ ...	55
Д.С. НУРАЕВ, Р.А. ХАБИБУЛЛИН_ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГОВОГО ТОКА И ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОКОЛО 3.4 ТГц .....	56
Д. В. ПАНОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЕРЕПЛАВЛЕНИИ.....	57
Е.В. ПАРКЕВИЧ, А.И. ХИРЬЯНОВА_СИЛЬНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ СОПРОВОЖДАЮТ ПРОХОЖДЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ НЕОДНОРОДНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ .....	58
В.И. ПИЧИЕНКО, Д.А. ДЕШИН, В.Д. ВОРОНОВ, Э.Д. ИШКИНЯЕВ, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ СОЗДАНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ ОБЛАСТЕЙ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА.....	59
В.М. ПРОКОПЬЕВ, Р.Р. СУСЛОВ, И.А. ФИЛАТОВ, Р.И. БОГДАНОВ, С.А. ХУБЕЖОВ, Г.В. ОДИНЦОВА_МОДИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ AISI 430 С ЦЕЛЬЮ	

УВЕЛИЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ПИТТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ.....	60
А.А. УШАКОВ, К.А. МАМАЕВА, С.А. РОМАНОВ, Т.В. ДОЛМАТОВ, П.А. ЧИЖОВ, В.М. ШЕВЛЮГА, В.В. БУКИН, С.В. ГАРНОВ_ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА .....	61
Г.С. РЫБАКОВ, А.А.УШАКОВ, Б.Д. ОВЧАРЕНКО_ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В Nd:YAG – ЛАЗЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛИННОГО РЕЗОНАТОРА.....	62
А.А. СЕРДОБИНЦЕВ, Л.Д. ВОЛКОВОЙНОВА_ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ДВУХСЛОЙНОЙ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКОЙ ПОДЛОЖКЕ.....	63
Е.В. УЛТУРГАШЕВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, М.С. КОВАЛЕВ, С.И. КУДРЯШОВ СВЕТОУЛАВЛИВАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ.....	64
Д.В. БАДИКОВ, А.А. ИОНИН, М.В. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.М. САГИТОВА, Е.П. ФЕДОРОВА_ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ СО-ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ BaGa <sub>2</sub> GeS <sub>6</sub> .....	65
В.А. ХОХЛОВ, Н.А. ИНОГАМОВ_ФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЗКОГО ПУЧКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА .....	66
Р.С. ШТРАЙХ, Р.А. ХАБИБУЛЛИН_ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ В ККЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ ИНЖЕКЦИОННОГО БАРЬЕРА .....	67
П.А. ЩЕГЛОВ, А.А. ТАУСЕНЕВ, М.В. ЧАЩИН, А.В. ЛАЗАРЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО, Т.А. СЕМЕНОВ, М.М. НАЗАРОВ_ШИРОКОПОЛОСНОЕ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ПЛАЗМЫ Kr И Ar ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	68
Н.А. КЛЕОПОВА, В.Н. АЛЕКСЕЕВА, Т.А. ДАЛЬБЕРГ, З.Б. ЗЫДРАБЫН, Н.А. КУЦЕКОБЫЛЬСКИЙ, М.М. ПОЛОЗОВА_СРАВНЕНИЕ КОНТАКТНОГО И ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДОВ СТЫКОВКИ ПЗС СЕНСОРОВ ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВЫХОДНОГО ЭКРАНА СТРИК-КАМЕРЫ.....	69
А.П. ЛАСКОВНЕВ, М.И. МАРКЕВИЧ, В.И. ЖУРАВЛЕВА, Д.В. ЖИГУЛИН, А.Б. КАМАЛОВ, Д.Ж. АСАНОВ_ЛАЗЕРНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ Cu В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	70
В.П. БИРЮКОВ_ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ .....	71
В.П. БИРЮКОВ_ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ .....	72
К.М. БУЛАТОВ, П.В. ЗИНИН_МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВО ВРЕМЯ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА .....	73
О.Г. ДЕВОЙНО, А.Г. СЛУЦКИЙ, В.А. ШЕЙНЕРТ, Э.А. ВАНЮК_ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКА ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЕЙНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ, ОПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ.....	74
А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, Б.Г. ХОЛОДАРЬ, М.В. НЕРОДА_МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА .....	75

К.А. ВОРОНКО, А.С. ЩЕКИН_МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОЙ МИКРОСВАРКИ ЦИРКОНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ND:YAG ЛАЗЕРА С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ.....	76
А.Ф. ГЛОВА, А.Ю. ЛЫСИКОВ, Е.Д. РАДЧЕНКО, И.Д. КЛОЧКОВ, Е.А. БУЯНОВА, П.Б. ПАПИН ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХВОЛНОВЫМ ПИРОМЕТРОМ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ .....	77
С.В. ДИАНОВ, Я.В. УЛЬЯНОВ, Е.Д. ТАРАКАНОВ_ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ И ФРАГМЕНТАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ВОЛЬФРАМА.....	78
К.Ф. ЗНОСКО, В.Ч. БЕЛАШ_ХеСl-ЭКСИЛАМПЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫМ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ.....	79
С.С. АНУФРИК, А.П. ВОЛОДЕНКОВ, К.Ф. ЗНОСКО_ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЭКСИПЛЕКСНОГО ЛАЗЕРА С ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 3 ДЖ .....	80
Е.А. КОВАЛЬ_ВЫСТРАИВАНИЕ И ОРИЕНТАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ МОЛЕКУЛ ДВУХЦВЕТНЫМИ ТРАПЕЦИЕВИДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	81
А.А. ЛИСКОВИЧ_ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ.....	82
М.А. КАРДАПОЛОВА, Н.И. ЛУЦКО, Л.И. ПИЛЕЦКАЯ_РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ .....	83
Е.Ю. МАЛАЩЕНКО, М.В. НИКАДОН, К.П. ФИЛИПКОВА, М.П. ПАТАПОВИЧ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВЫСОХШЕЙ КАПЛИ ПЛАЗМЫ КРОВИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.....	84
А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Е.В. УЛТУРГАШЕВА, И.М. ПОДЛЕСНЫХ, Н.Г. СЦЕПУРО, М.С. КОВАЛЕВ, С.И. КУДРЯШОВ_НАНОСЕКУНДНАЯ ФАБРИКАЦИЯ СВЕРХЛЕГИРОВАННОГО СЕРОЙ КРЕМНИЯ .....	85
А.А. УШАКОВ, К.А. МАМАЕВА, С.А. РОМАНОВ, Т.В. ДОЛМАТОВ, П.А. ЧИЖОВ, В.М. ШЕВЛЮГА, В.В. БУКИН, С.В. ГАРНОВ_ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА .....	86
А.А. СВИРИДОВА, А.С. ЩЕКИН, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ, А.А. ИВАНОВ_ОСОБЕННОСТИ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ.....	87
Д.С. СТЕПАНЮК, М.А. ЗАЙКИНА, Е.А. ЕЛТЫШЕВА, Д.А. СИНЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКЦЕПТОРНОЙ ПОДЛОЖКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ.....	88
Е.В. УЛТУРГАШЕВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Э.Р. ТОЛОРДАВА, С.И. КУДРЯШОВ ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНОГО МЕТОДА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПРЯМОГО ПЕРЕНОСА НАНОЧАСТИЦ МЕДИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РОСТА БАКТЕРИЙ.....	89
Я.В. УЛЬЯНОВ, А.В. РУДЫЙ, Е.И. МАВРЕШКО, Е.А. ЧЕШЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КЕРАМИКИ НА АЛЮМО-ИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ, ЛЕГИРОВАННОМ ИОНАМИ НЕОДИМА .....	90
А.В. ЩУКО, Н.Х. ЧИНЬ, М.П. ПАТАПОВИЧ_ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ ПО ДИАМЕТРУ КАПЛИ БИООБРАЗЦОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА .....	91

М.А. ЯМЩИКОВА, В.М. ЯМЩИКОВ_РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ОБЛАСТИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА .....	92
Е.А. ЯРУНОВА, А.А. КРЕНЦ, Н.Е. МОЛЕВИЧ_СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НЕЛИНЕЙНОГО УСИЛЕНИЯ.....	93
Ю.А.ЧИВЕЛЬ_ЭФФЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ.....	94
Ю.А.ЧИВЕЛЬ_ПОЛУЧЕНИЕ МУЛЬТИ-МАТЕРИАЛЬНЫХ 3Д ИЗДЕЛИЙ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ.....	96
Н.А. ИНОГАМОВ, В.В. ЖАХОВСКИЙ, В.А. ХОХЛОВ, Ю.В. ПЕТРОВ_ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЬФ НИЯУ МИФИ В ТЕХНОЛОГИЯХ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ .....	98
Н.Е. АНДРЕЕВ_СВЕРХЯРКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ МЭВ-НОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ПЕН, ОБЛУЧАЕМЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИ ИНТЕНСИВНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ .....	99
Н.Г. БОРИСЕНКО_МИШЕНИ И ВОЗМОЖНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ «ПЕРВОГО ДНЯ» ДЛЯ ПРОГРАММЫ ЭЛЬФ .....	100
С.Г. БОЧКАРЕВ, О.Е. ВАЙС, М.Г. ЛОБОК, В.Ю. БЫЧЕНКОВ_ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В РЕЖИМЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ПИКΟΣЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСОМ .....	101
А.В. БРАНТОВ, М.А. РАКИТИНА, С.И. ГЛАЗЫРИН, А.С. КУРАТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ .....	102
С.И. ГЛАЗЫРИН, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ_ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УСТАНОВКЕ ЭЛЬФ.....	103
Ф.А. КОРНЕЕВ, Н.Д. БУХАРСКИЙ_ДИНАМИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ .....	104
А.П. КУЗНЕЦОВ, В.Н.ДЕРКАЧ, С.Г. ГАРАНИН, В.В. КРАВЧЕНКО, Ф.А. КОРНЕЕВ, А.В. ЛОБАНОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, А.П. МЕЛЕХОВ, А.А. СОЛОВЬЕВ, И.Б. МУХИН, С.А. ПИКУЗ ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА ЛАЗЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ ЭЛЬФ: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА И СТАТУС ПРОЕКТА .....	105
К.И. ВОЛКОВ, В.Н. ДЕРКАЧ, М.С. ДУДАЛИН, В.В. КРАВЧЕНКО, А.П. КУЗНЕЦОВ, А.В.ЛОБАНОВ, А.П. МЕЛЕХОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, Д.Е. РАДЫГИН_СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА “ЭЛЬФ” .....	106
С.С. МАКАРОВ, С.Н. РЯЗАНЦЕВ, И.Ю. СКОБЕЛЕВ, М.А. АЛХИМОВА, М.В. СЕДОВ, С.А. ПИКУЗ_ВОЗМОЖНЫЕ ПОСТАНОВКИ ЛАБОРАТОРНО-АСТРОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЭЛЬФ» .....	107
С.Ю. ГУСЬКОВ_О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛАЗЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ «ЭЛЬФ».....	108
Секция МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА .....	109
А.Р. КАРИМОВ, М.А. СОЛОМАТИН_КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ, НЕРАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В SIER МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ .....	110



В.Г. СОРОКИН_ПРИНЦИП СТРУКТУРНОЙ АНАЛОГИИ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ.....	111
Г.Ю. СТАНИШЕВСКИЙ, А.А. ПИСАРЕВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОГО ЛИТИЯ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСХОДАХ .....	112
Д.Е. СТОВПЕЦ, А.Я. ПАК, Г.А. БЛЕЙХЕР_МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТИГЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ СИНТЕЗЕ ВЕЩЕСТВ .....	113
А.И. ЕСИС, М.А. ЧМЫХОВ_ГЕНЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КАНАЛЬНОГО РАДИАТОРА.....	114
В.С. ПОПОВ, Д.В. КОНДРАТОВ, М.В. ПОПОВА, Т.С. КОНДРАТОВА_КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ, ИМЕЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИЙ ПОДВЕС И ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩИЙ СЛОЙ ВЯЗКОГО ГАЗА .....	115
А.В. ПОРУБОВ_ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАМАТЕРИАЛА НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ.....	116
О. РАЖАБОВ, С. МИРЗАЕВ, М. ЮСУПОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧИСТКИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ СТОЧНЫХ ВОД ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ ЧЕРЕЗ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ .....	117
И.Г. РАЗЕНКОВ, М.А. ЧМЫХОВ_РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ ОРЕНФОАМИ ЛОГОС, ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	118
В.М.РУДЕНКО, Е.В.КОРОТКОВ_БИОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕНОМА <i>S. MEROLAE</i> .....	119
Е.А. ОВСЯННИКОВ_РАЗРУШЕНИЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ИЗ ТЕОРИИ ИОННО-ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ .....	120
Д.А. ОВСЯННИКОВ, И.Д. РУБЦОВА, Л.В. ВЛАДИМИРОВА, Н.С. ЕДАМЕНКО, А.Р. БУШИН_ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПАРАМЕТРИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ.....	121
У.К. МАХМАНОВ, А.Н. ОЛИМОВ_АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ .....	122
А.П. ПИЛИПЧУК, О.Г. ДЕВОЙНОМОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНО-КРУГОВОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА.....	123
Е.И. ПОНЬКИН_ПОЛУЧЕНИЕ n-ЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЯДА ПО $c_n, u_n, v_n$ , СТЕПЕНЯМ $\vartheta$ ДЛЯ ИСКОМЫХ ФУНКЦИЙ $c(\xi, \vartheta), u(\xi, \vartheta), v(\xi, \vartheta)$ В ЗАДАЧЕ ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ .....	124
П. СИРИВАТ, С.В. МЕЛЕШКО_ПРИМЕНЕНИЕ RECIPROCAL ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ, СВЯЗАННОЙ С КЛАССИЧЕСКИМ ОДНОМЕРНЫМ УРАВНЕНИЕМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ .....	126
Л.И. МОГИЛЕВИЧ, Е.В. ПОПОВА, М.В. ПОПОВА_НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В СТЕНКАХ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА ИЗ МАТЕРИАЛА С КОМБИНИРОВАННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И ЗАПОЛНЕННОГО ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ.....	127
В.В. НАЗАРОВ_КРИТЕРИЙ НАЧАЛА РАЗРУШЕНИЯ В ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ В УСЛОВИЯХ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ.....	128

Н.А. КУДРЯШОВ, Д.Р. НИФОНТОВ_ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА .....	129
А.А. НОВИКОВ, А.Ю. ЛЕТУНОВ, П.А. ЛОБОДА_МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ПЛОТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ИОННОЙ ДИНАМИКИ .....	130
А.Н. КУЛИКОВ, Д.А. КУЛИКОВ_ЛОКАЛЬНЫЕ БИФУРКАЦИИ ИНВАРИАНТНЫХ МНОГООБРАЗИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ КУРАМОТО-СИВАШИНСКОГО С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИИ.....	131
А.А. КУТУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ_АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА С АНТИКУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТРЕТЬЕЙ, ПЯТОЙ И СЕДЬМОЙ СТЕПЕНИ.....	132
М.В. КУТЫРЕВ, В.В. КУЗЕНОВ_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ С ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ.....	133
С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ_РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ИЗ ИЕРАРХИИ КАУПА-НЬЮЭЛЛА В ПЕРЕМЕННЫХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ .....	134
С.А. ЛАДЫГИН, Р.Н. КАРАЧУРИН, К.Е. ШИЛЬНИКОВ, П.Н. РЯБОВ_ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТОК ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ КОНВЕКЦИИ-ДИФФУЗИИ .....	135
Е.В.КОРОТКОВ_ДИСПЕРСНЫЕ ПОВТОРЫ В ГЕНОМАХ БАКТЕРИЙ.....	136
Д.О. КОСТЕНКО, Е.В. КОРОТКОВ_ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА MANDSДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ВЫРАВНИВАНИЙ СЛАБО ГОМОЛОГИЧНЫХ БЕЛКОВЫХ СЕМЕЙСТВ .....	137
А.О. КАЗАЧИНСКИЙ, И.Ю. КРУТОВА_АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА .....	138
С.Г. КЛИМАНОВ, А.В. КРЯНЕВ, В.А. ТРИКОЗОВА, Д.Д. ЦАРЕВА_ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ (ИВЛ) .....	139
А.Е. КУВШИННИКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛАСТИНЫ РАЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ.....	140
Т.Р. КАЛИМУЛЛИН, Е.В. СТЕПИН_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В КОАКСИАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ.....	141
В.Л. КАМЫНИН_ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ $x$ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ В МНОГОМЕРНОМ НЕРАВНОМЕРНО ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ.....	142
О.В. КАПЦОВ_ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ МОНЖА-АМПЕРА .....	143
А.Л. КИРСАНОВ, А.С. МАТВЕЕВ_АВТОНОМНОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ АНСАМБЛЕЙ ДРОНОВ .....	144
А.М.КИРСАНОВА, А.А. ДАНИЛОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЕСЕННЫХ СЕТОК.....	145

С.П. БАУТИН, И. А. ВАЗИЕВА_ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ.....	146
В.В. ВЕДЕНЯПИН, Н.Н. ФИМИН, В.М. ЧЕЧЁТКИН, А.А.РУССКОВ_ОБ УРАВНЕНИЯХ ТИПА ВЛАСОВА, КОСМОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ И РАСШИРЕНИИ ВСЕЛЕННОЙ .....	147
В.С.ДРЮМА_О ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОДУ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ЦИКЛАМИ.....	148
В.И. ЕРОФЕЕВ, А.В. ЛЕОНТЬЕВА, А.В. ШЕКОЯН_ПРОСТРАНСТВЕННО ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В МАТЕРИАЛАХ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ .....	149
А.И. ЗЕМЛЯНУХИН, Н.А. АРТАМОНОВ, В.А. БОЧКАРЕВ___ФИЗИЧЕСКАЯ НЕРЕАЛИЗУЕМОСТЬ ТОЧНЫХ УЕДИНЕННО – ВОЛНОВЫХ РЕШЕНИЙ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ .....	150
А.В. АКСЕНОВ, А.Д. ПОЛЯНИН_ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТИПА МОНЖА – АМПЕРА.....	151
М.В. АРТЕМЬЕВА, М.О. КОРПУСОВ_РАЗРУШЕНИЕ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ТЕПЛО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ (1+1)-МЕРНОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПОЛУПРОВОДНИКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ .....	152
А.А. БАЙРАМУКОВ, Н.А. КУДРЯШОВ_ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЁДИНГЕРА С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ СЕДЬМОЙ СТЕПЕНИ.....	153
С.П. БАУТИН, А. Г. ОБУХОВ_ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ .....	154
К.В. БРУШЛИНСКИЙ, М.Т. ИСТОМИНА, В.В. КРЮЧЕНКОВ, Е.В. СТЁПИН МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В НЕОДНОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ.....	155
A BISWAS_QUASI—STATIONARY OPTICAL GAUSSONS WITH MAXIMUM INTENSITY .....	156
M. AHMADPOORTORKAMANI, A. CHEVIAKOV_SPATIAL-TEMPORAL SIR MODELS WITH VITAL DYNAMICS .....	157
S.S.M. MCADAM, S.O. AGYEMANG, A. CHEVIAKOV, B. PITZEL_NONLINEAR LOVE WAVE MODELS IN HYPERELASTICITY AND VISCOELASTICITYFRAMEWORKS .....	158
A. SHEVYAKOV, J. KELLER_NEW EXACT AXIALLY AND HELICALLY SYMMETRIC SOLUTIONS TO PLASMA EQUILIBRIUM EQUATIONS .....	159
С.З. АДЖИЕВ, И.В. МЕЛИХОВ, В.В. ВЕДЕНЯПИН, А.В. ГОПИН, Я.Г. БАТИЩЕВА НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОГО ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ .....	160
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Л.В. РУДАК, Н.И. МИСЮЧЕНКО_ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ИНИЦИИРОВАННОЕ ПОЛЕТОМ ТЕЛА С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ .....	161
А.В. ТЕТЕРЕВ, И.М. КОЗЛОВ, Н.И. МИСЮЧЕНКО, Л.В. РУДАК_МЕТОД РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КИНЕТИКИ ГОРЕНИЯ.....	162
В. В. ЦЕГЕЛЬНИК_О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ .....	163

П.А. ЧУПРОВ, С.В. ФОРТОВА, В.В. ШЕПЕЛЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ БАЕРА-НУНЦИАТО .....	164
П. А. ЧУПРОВ, П. С. УТКИН_ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ БАЕРА-НУНЦИАТО.....	165
И.Е. ШИПИЦЫН_АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ .....	166
Секция ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ .....	167
Б.Ж. ЧЕКТЫБАЕВ, И.Л. ТАЖИВАЕВА, Е.А. КАШИКБАЕВ, С.А. ЖУНИСБЕК, А.Ж. ДУЙСЕН ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ КТМ В 2023 ГОДУ .....	168
М.Е. СУХОВИЦКАЯ, В.Д. ПУСТОВИТОВ_УЧЕТ ТОРОИДАЛЬНОСТИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ НА СТЕНКУ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА .....	169
А.Ю. ТОКАРЕВ, А.Ю. ЯШИН, Н.С. ЖИЛЬЦОВ, Г.С. КУРСКИЕВ, В.Б. МИНАЕВ, Ю.В. ПЕТРОВ, А.М. ПОНОМАРЕНКО, Н.В. САХАРОВ_ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 .....	170
В.Ю. САВИН, В.Д. ПУСТОВИТОВ_ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В КРУГЛОМ ТОКАМАКЕ С ЗАЗОРОМ ПЛАЗМА-СТЕНКА.....	171
О.Д. КРОХАЛЕВ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ_РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ.....	172
ПАШКОВ И.И., ПРИШВИЦЫН А.С., ЕФИМОВ Н.Е., ПОДОЛЯКО Ф.С., А.С. БЕЛОВ, КРАТ С.А. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0.....	173
А.Д. ИЗАРОВА, А.Ю. БАЛАШОВ, А.М. БЕЛОВ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, Г.А. САРАНЧА, А.В. СТЁПИН, А.В. СУШКОВ_ПРИМЕНИМОСТЬ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЗОНДОВ МИРНОВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ МГД-АКТИВНОСТИ ПЛАЗМЫ В НЕКРУГЛОМ ТОКАМАКЕ .....	174
И.БАЙДИН, А. МОЗГОВОЙ, А. ОГИНОВ, К. ШПАКОВ, И. ТИЛИКИН, А.РОДИОНОВ, Е. ПАРКЕВИЧ, Х. СМАЗНОВА_СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ПУТЕМ СТОЛКНОВЕНИЯ ДВУХ КОМПАКТНЫХ ТОРОВ.....	175
Е.А. ВЕНИЦКИЙ, О.Д. КРОХАЛЕВ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, Я.М. АММОСОВ, Н.А. ВАДИМОВ, М.А. ДРАБИНСКИЙ, И.А. ШЕЛЕГЕДА, Г.А. САРАНЧА, А.В. МЕЛЬНИКОВ_МАТРИЧНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА Т-15МД .....	176
Я.М. АММОСОВ, Е.А. ВЕНИЦКИЙ, О.Д. КРОХАЛЕВ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, Н.А. ВАДИМОВ, М.А. ДРАБИНСКИЙ, И.А. ШЕЛЕГЕДА, Г.А. САРАНЧА, А.В. МЕЛЬНИКОВ_РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД.....	177
Н.Е. ЕФИМОВ, Р.И. ХУСНУТДИНОВ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.Б. КУКУШКИН_ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ И ВОЛЬФРАМОВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ИТЭР АТОМАМИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА .....	178

А.Б. КУКУШКИН, А.А. КУЛИЧЕНКО_ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА КРОСС-ФАЗЫ СИГНАЛОВ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ОТ МГД СКОРОСТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ.....	179
Н.А. ВАДИМОВ, Е.А. ВИНИЦКИЙ, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ, Н.К. ХАРЧЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ, Г.А. САРАНЧА, М.А. ДРАБИНСКИЙ_ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОФОКУСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОМ СТЕНДЕ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД.....	180
Д.Р. ФИЛИПЕНКО, П.В. МИНАШИН_УПРОЩЕННЫЙ ЛУЧЕВОЙ КОД ДЛЯ РАСЧЕТА МНОГОПРОХОДНОГО ЭЦ-ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЭМ-ВОЛН ПЛАЗМОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ.....	181
В.В. АНДРЕЕВ, А.А. НОВИЦКИЙ, А. НИАМАНЕШ_ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ ПРИ АВТОРЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ДЛИННОМ ПРОБКОТРОНЕ.....	182
С.В. КУЗНЕЦОВ_УЕДИНЕННАЯ ИОННО-ЗВУКОВАЯ ВОЛНА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ.....	183
И.И. ФАЙРУШИН, А.В. МОКШИЦ_САМОСОГЛАСОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ ИОНОВ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ЮКАВЫ .....	184
А.Ю. ШЕМАХИН_СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ.....	185
А.И. ХИРЬЯНОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ, Д. В. ТОЛБУХИН_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ С ОДНОРАКУРСНОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ .....	186
УЛАСЕВИЧ Д.Л., ХАЙРУТДИНОВ Р.Р., АНДРЕЕВ В.Ф. АСАДУЛИН Г.М., СЕРГЕЕВ Д.С., РЫЖАКОВ Д.В._ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД.....	187
А.И. САЙФУТДИНОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ КОРОТКОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ .....	188
А.В. ДЕДУРА, Д.С. ЛЕОНТЬЕВ, В.С. ЛИСИЦА_ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕКТРА ВОДОРОДА В MSE-ДИАГНОСТИКЕ.....	189
А.Б. ЛЯШЕНКО, А.А. СТЕПАНЕНКО_ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ...	190
Д.Л. КИРКО, Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, А.С. САВЕЛОВ_ИЗУЧЕНИЕ МИКРООБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ .....	191
И.Г. ГРИГОРЬЕВА, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ_ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА .....	192
Л.В. ФУРОВ, А.С. ПОСАНЧУКОВА, О.И. ТАРАСОВА_ПЛАЗМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ИСТОЧНИК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО УДАРА .....	193
А. БАСАК, А.С. ДРОЗД, И.И. ПАШКОВ, А.С. ПРИШВИЦЫН, С.А. САПРОНОВ, С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН_СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0.....	194

А.В. НИКОЛАЕВА, А.С. ПРИШВИЦЫН, И.И. ПАШКОВ, С.А. КРАТ_ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШНУРА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0 НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА .....	195
И.А. КОЗИН, Е.В. ПАРКЕВИЧ, А.И. ХИРЬЯНОВА, Д.В. ТОЛБУХИН, К.В. ШПАКОВ УСТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ РАННЕЙ СТАДИИ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ .....	197
В.А. ТУРИКОВ_НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА УДВОЕННОЙ ВЕРХНЕГИБРИДНОЙ ЧАСТОТЕ .....	198
М.С. НОВИКОВ, М.М. ХАРЬКОВ, Г.С. ЛОМОНОСОВ, Д.В. КОЛОДКО, А.В. КАЗИЕВ, А.В. ТУМАРКИН, О.В. ОГОРОДНИКОВА_АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ СМЕСЕЙ He/D <sub>2</sub> .....	199
Ю.М. КРЫЛОВ, Д.Н. СОВЫК, В.Г. РАЛЬЧЕНКО_ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРМОДИНАМИКУ КЛЮЧЕВЫХ РЕАКЦИЙ ТРАВЛЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В КИСЛОРОД-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ .....	200
О.А. БАШУТИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, И.Г. ГРИГОРЬЕВА, А.С. САВЕЛОВ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ СПЕЦИФИКА СТРУКТУРЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРНОСТИ НА ЭЛЕКТРОДАХ.....	201
А.И. САЙФУТДИНОВ, Е.В. КУСТОВА_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФИЛАМЕНТАЦИИ МИКРОВОЛНОВЫХ РАЗРЯДОВ .....	202
СМАЗНОВА Х.Т., ПАРКЕВИЧ Е.В._ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ДЛИННОВОЛНОВУЮ ОБЛАСТЬ .....	203
О.А. БАШУТИН, П.П. СИДОРОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ПФМ-72М.....	204
И.С. БАЙДИН, К.С. ВИНОГРАДОВА, А.В. ОГИНОВ, П.А. ПАВЛОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ, А.А. ТАРАСЕНКО, А.И. ХИРЬЯНОВА, К.В.ШПАКОВ_СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЧ В ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА.....	205
А.М. АЛЁХИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. МОРОЗОВА, И.Г. ГРИГОРЬЕВА, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, А.Е. ШИКАНОВ_КОЛЛЕКТОРНЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В НАНОСЕКУНДНОМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ .....	206
Е.А. МОРОЗОВА, Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ_ПРОЕКТ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ .....	207
Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.П. МЕЛЕХОВ, Г. С. БОГАТЫХ, Б. У. АСРОРОВ ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ЭМИССИЮ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ .....	208
А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. СКОБЛЯКОВ, В.А. ВОЛКОВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	209
М.В. ЧАЩИН, П.А. ЩЕГЛОВ, А.А. ТАУСЕНЕВ, Т.А. СЕМЕНОВ, М.М. НАЗАРОВ МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ НАКАЧКИ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ .....	210

А.Е. ДАНИЛОВ, С.Ю. ГОЛОВКИН, В.Н. ДЕРКАЧ, Л.А. ДУШИНА, В.Н. ПУГАЧЁВА, П.В. СТАРОДУБЦЕВ, А.Ю. ВОРОНИН, Л.П. ВЫЛОМОВ_ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАЛОПЛОТНЫХ СРЕД.....	211
И.М. МОРДВИНЦЕВ, Т.А. СЕМЕНОВ, К.А. ИВАНОВ, Р.В. ВОЛКОВ, А.В. ЛАЗАРЕВ, М.С. ДЖИДЖОЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО, А.Б. САВЕЛЬЕВ_ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ЭТАНА .....	212
Д.Г. ЛОСКУТНИКОВ, А.С. САВЁЛОВ_РАЗРАБОТКА И НАЛАДКА ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	213
Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ, А.В. СИДОРОВ, Н. И. АРТЕМЧУК, А.М. ЗАХАРОВ_НОВООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ ОБЛУЧАЕМОЙ ИОНАМИ АРГОНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ.....	214
Е.Ю. ТУЛУБАЕВ, В.Н. КУДИЯРОВ, И.Л. ТАЖИБАЕВА, Ю.В. ПОНКРАТОВ, Ю.Н. ГОРДИЕНКО, В.С. БОЧКОВ, Э. САПАРБЕК_ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОЛОВЯННО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ.....	215
Н.О. САВВИН, А.Е. ЕВСИН, И.Д. ЖДАНОВ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Н.А. ПУНТАКОВ, А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ_ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ХАРАКТЕР ИХ ОКСИДИРОВАНИЯ В ГАЗООБРАЗНОМ КИСЛОРОДЕ И В КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ .....	216
Д.А. БУТНЯКОВ, И.А. СОРОКИН, Д.В. КОЛОДКО__МАСШТАБИРОВАНИЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА С ПЛОСКИМ ПОЛЫМ КАТОДОМ С АСИММЕТРИЧНОЙ ПОДАЧЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ.....	217
К.И. РОМАНОВ, Е.А. ШЕРШУНОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ В ВОЗДУХЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ .....	218
Б.В. АХРЕМЕНКОВ, В.И. БЕРЕСТЕНКО, А.В. ПРОКОПЕНКО, А.О. МОРОЗОВ_РАЗРАБОТКА УЗЛОВОГО ДИЗАЙНА УСТРОЙСТВА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА МЕТАНА НА ОСНОВЕ СВЧ-МАГНЕТРОНА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА МЕТОДОМ СДВИГА ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ .....	219
С.Д. ФЕДОРОВИЧ, Ю.В. МАРТЫНЕНКО, В.П. БУДАЕВ, Ю.И. РУКИНА_РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ .....	220
А.А. СЕРГЕЕЧЕВ, А.К. КУТУКОВ, М.А. МИЛЛЕР, В.В. ГАПОНОВА_ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ.....	222
Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ, А.Т. СААКЯН, В.Н. ПУЗЫРЁВ_ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ МИШЕНЕЙ ИЗ МЕДИ, СЕРЫ И ВОЛЬФРАМА В ДИАПАЗОНЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ .....	223
Г.С. ЛОМОНОСОВ, М.М. ХАРЬКОВ, Д.В. КОЛОДКО, М.С. НОВИКОВ, А.В. ТУМАРКИН, А.В. КАЗИЕВ, О.В. ОГОРДНИКОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОЙ ФРАКЦИИ ПОТОКОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ СМЕСЕЙ He/D <sub>2</sub> .....	224
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОСИСТЕМ .....	225
В.Н. АВДИЕВИЧ, Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, Г.С. НУЖДОВ_ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВАКАНСИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА LaF <sub>3</sub> .....	226
А.А. АВЕРКИЕВ, Р.Д. РОДРИГЕС, Е.С. ШЕРЕМЕТ_ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЛАЗМОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ .....	227

Ю.В. АГРАФОНОВ, И.С. ПЕТРУШИН, Д.В.ХАЛАИМОВ, И.В.БЕЗЛЕР, Р.Ю.ЛЕОНТЬЕВ СИНГЛЕТНОЕ УРАВНЕНИЕ ФИЗИКИЖИДКОСТЕЙ. УЧЁТ НЕПРИВОДИМЫХ ДИАГРАММ .....	228
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ_МАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОРНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ .....	229
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН_ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ЛОРЕНЦА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР .....	230
К.Х. АШИККАЛИЕВА, Т. В. КОНОНЕНКО, Е.Е. АШКИНАЗИ, Е.А. ОБРАЗЦОВА, В.Г. РАЛЬЧЕНКО, В.И. КОНОВ_МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В CVD АЛМАЗЕ .....	231
Ф.Р. АХМЕДЖАНОВ, М.И. ЭЛБОВА_ВЛИЯНИЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА НА АКУСТООПТИЧЕСКУЮ ДОБРОТНОСТЬ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА.....	232
К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН, С.В. ВЕСЕЛОВА, С.В. ПОКРОВСКИЙ_ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ .....	233
И.Ж. БУНИН, М.В. РЯЗАНЦЕВА, И.А. ХАБАРОВА_ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА.....	234
С.В. ВЕСЕЛОВА, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ_ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК СВЕРХПРОВОДЯЩЕГОГЕНЕРАТОРА НА ПОТЕРИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА .....	235
В.В. ВОЛКОВА, В.В. ФИЛАТОВ_НЕУПРУГОЕ ПОЛЯРИТОН-ПОЛЯРИТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В РУБИНЕ.....	236
В.В. ВОЛКОВА, Д.А. ГАВРИЛОВЕЦ, А.Д. КОТОВА, В.В. ФИЛАТОВ_БОЗЕ- ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНДЕНСАЦИЯ УНИТАРНЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ОПАЛОВ .....	237
Ю.А. ВЫПРИЦКАЯ, А. Д. ЧЕРТОВА, Ф.И. ЧУДАРИН, Е.И. ПАЦЕРА, Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ_ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙМЕТОДОМ HIPMCS ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИШЕНИ ИЗВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГОСПЛАВА (Mo <sub>0.2</sub> Ta <sub>0.2</sub> Nb <sub>0.2</sub> Zr <sub>0.2</sub> Hf <sub>0.2</sub> )SiB.....	238
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Ш.П. ФАРАДЖЕВ, П.М. САЙПУЛАЕВ, А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, Р.М. ЭМИРОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ, Л.Р. ХИБИЕВА_НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТА БАРИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ОДИН ЭТАП .....	239
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Ш.П. ФАРАДЖЕВ, А.Э. РАБАДАНОВА СЛОИСТАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ВГЕО <sub>3</sub> , ПРОЯВЛЯЮЩАЯ МЕМРИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА .....	240
М.Д. ГРИЦКЕВИЧ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ_ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО СВЕРХНИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТРЕНИЯ .....	241



Д.С. ДАЙБАГЕ, С.А. АМБРОЗЕВИЧ, А.В. ОСАДЧЕНКО, И.А. ЗАХАРЧУК, А.С. СЕЛЮКОВ, М.С. СМИРНОВ, О.В. ОВЧИННИКОВ_ФОТОУСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdTe/SiO <sub>2</sub> .....	242
Е.В. ДВОРЕЦКАЯ, Р.Б. МОРГУНОВ_ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ НА ФРАКТАЛЬНОСТЬ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХТОНКОЙ НАНОСЕТИ Ni.....	243
А.И. ДМИТРИЕВ, Л.С. ПАРШИНА, М.С. ДИТРИЕВА, О.Д. ХРАМОВА, О.А. НОВОДВОРСКИЙ МАГНЕТИЗМ ПЛЕНОК InMnSb, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ .....	244
С.Р. ЕГИЯН, В.Н. АНТОНОВ, О.А. КЛИМЕНКО_ИНФРАКРАСНЫЙ ФОТО-ДЕТЕКТОР С ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ В СТРУКТУРАХ С ДВУМЯ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ.....	245
Т. ЖУРАБОВЕВ, Н. ЭСАНТУРДИЕВА, У. ХАЛИЛОВ_ПОВЕРХНОСТЬ С ВЫСОКИМ ИНДЕКСОМ ДЛЯ РОСТА ГРАФЕНА.....	246
В.В. ЗАЛЕТКИНА, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ВТСП МЕТОДОММОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ.....	247
М.Г. ИСАЕНКОВА, О.А. КРЫМСКАЯ, В.А. ФЕСЕНКО, М.И.ПЕТРОВ, И.В. КОЗЛОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ .....	248
З.А. ИСАХАНОВ, Р. ДЖАББАРГАНОВ, Р.Т. КУРБАНОВ, М.А.МАХМУДОВ_ВЫХОД ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ KBr ЩЕЛОЧНЫМИ ИОНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ .....	249
А.В. КАЛАШНИКОВ, А.В. КРАСАВИН, В.Д. НЕВЕРОВ_ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА КРИТИЧЕСКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ БОГОЛЮБОВА-ДЕ ЖЕНА .....	250
П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ_ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ЭНЕРГИИ.....	251
П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ_ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ ОПТИЧЕСКИ ВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ГРАФЕНЕ ДЛЯ ЗАДАЧ БОЛОМЕТРИИ....	252
Ю.В. КИСЛИНСКИЙ, Н.В. ДУБИЦКИЙ, К.И. КОНСТАНТИНЯН, И.Е. МОСКАЛЬ, А.М. ПЕТРЖИК, Г.А. ОВСЯННИКОВ, А.В. ШАДРИН_ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ИРИДАТА СТРОНЦИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ.....	253
А.В. КЛАУЗ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. ХОМИЧ, А.А. БОГАЧЁВ, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ.....	254
П.В. КОНАРЕВ, В.В. ВОЛКОВ, А.Е. КРЮКОВА, В.А. ГРИГОРЬЕВ, Г.С. ПЕТЕРС_МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ЧАСТИЦЫ НЕИЗВЕСТНОГО КОМПОНЕНТА В БЕЛКОВЫХ СМЕСЯХ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ.....	255
В.О. КУВОНДИКОВ, И.Р. БОЙНАЗАРОВ, S. MINGLIANG, Ш.К. НЕМАТОВ_ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ПОГЛОЩЕНИЕ АКТИВНОГО СЛОЯ ОРГАНИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ БЕНЗОБИСТИАЗОЛА.....	257
М.А. КУЛАГИНА, В.В. ФИЛАТОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ХИГГСА В ОПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ .....	258

Р.С. ЛАПТЕВ, А.Д. ЛОМЫГИН, Ч. ВАН_ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ Zr/Nb ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ГЕЛИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИЗОХРОННОМ ОТЖИГЕ .....	259
Р.С. ЛАПТЕВ, А.Д. ЛОМЫГИН, Ч. ВАН_ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ Zr/Nb ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИЗОХРОННОМ ОТЖИГЕ.....	260
Д.Э. ЛЕСНЫХ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, В.Н. НЕВОЛИН, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ WSe <sub>2</sub> В ЖИДКОСТИ ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА ВОДОРОДА.....	261
А.Н. МАКСИМОВА, С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ, В.А. КАШУРНИКОВ РАСЧЕТ ОТКЛИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА НА ИМПУЛЬСЫ ТОКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ НАГРЕВА .....	262
А.Ю. МАЛЯВИНА, И.В. МАРТИРОСЯН, С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ_ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ .....	263
И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ, А.Н. МОРОЗ, И.А. РУДНЕВ АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШИРОКОГО СПЕКТРА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ.....	264
И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, М.А. ОСИПОВ, С.А. КРАТ, И.А. РУДНЕВ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА .....	265
Ш. МАТНАЗАРОВА, М. ИСАКЖАНОВА, У. ХАЛИЛОВ, М. ЮСУПОВ_КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНДОЭДРАЛЬНЫХ АТОМОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНОВ .....	266
А. ОЛИМОВ, Т.А. ЧУЛИЕВ_ПОЛУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРОМ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C <sub>60</sub> .....	267
У.К. МАХМАНОВ, Б.А. АСЛОНОВ, Ш.А. ЭСАНОВ, К.Н. МУСУРМОНОВ, А.Х. ШУКУРОВ, З. БЕКМУРОДОВ, Т.А. ЧУЛИЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАСТВОРАХ ФУЛЛЕРЕНА C <sub>70</sub> .....	268
К. МЕХМОНОВ, А. ЭРГАШЕВА, У. ХАЛИЛОВ_ПОНИМАНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО РОСТА ЭНДОЭДРАЛЬНОЙ ГРАФЕНОВОЙ НАНОЛЕНТЫ.....	269
А.А. МИХАЙЛОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ_ГЕНЕРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СХЕМЕ КОРБИНО ДЛЯ ВТСП .....	270
Ш.А.МУМИНОВА, А.Н.УЛУКМУРАДОВ, И.Д.ЯДГАРОВ_АДСОРБЦИЯ АЗОТА НА ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....	271
Ж.Х. МУРЛИЕВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ_СВЯЗЬ ФОНОННОГО ТЕПЛОСОПРОТИВЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛОВ СКОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ .....	272
А.А. НИКИТИН, С.В. РОГОЖКИН, О.В. ОГОРДНИКОВА, А.А. БОГАЧЕВ, П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА W-10Cr-0.5Y ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	273

Д.С. НИКИТИН, А. НАСЫРБАЕВ, А.А. СИВКОВ_ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА .....	274
И.В. НИКОЛАЕВ, Н.Г. КОРОБЕЙЩИКОВ, А.В. ЛАПЕГА, Д.В. ТОПАКОВ, Д.В. ЧЕСНОКОВ, Н.А. УСУБАЛИЕВ_СГЛАЖИВАНИЕ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА .....	275
П.И. НИКОЛЕНКО, И.В. ЩЕТИНИН, Т.Р. НИЗАМОВ, Ю.О. КУЛАНЧИКОВ_СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $SRFe_{12-x}In_xO_{19}$ ( $x = 1,8$ И $2$ ) С ПЕРСПЕКТИВОЙ ДЛЯ БИОМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ .....	276
С.А. НУРЕТДИНОВ, В.В. ТАРКОВСКИЙ, А.В. ЗЕЛЕНКО_РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО СИНТЕЗА В ВОДЕ.....	277
И.Ф. НУРИАХМЕТОВ_МОДИФИКАЦИЯ РЕЗИСТИВНОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ПОЛИЕН-ПОЛИИНОВЫХ ЦЕПОЧЕК НАНОЧАСТИЦАМИ $TiO_2$ .....	278
М.А. ОСИПОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, С.В. ПОКРОВСКИЙ НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ НА ОСНОВЕ СТОПОК ВТСП ЛЕНТ.....	279
Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Х. РАБАДАНОВ, М.Э. ИСХАКОВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Р.М. ЭМИРОВ, А.Э. РАБАДАНОВА_СВЯЗЬ ФОНОННОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ С ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ.....	280
С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ, И.В. МАРТИРОСЯН, А.Н. МАКСИМОВА, Д.А. АБИН, А.Н. МОРОЗ, М.А. ОСИПОВ, С.В. ВЕСЕЛОВА, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, К.А. БОРОДАКО, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, А.Ю. МАЛЯВИНА, И.К. МИХАЙЛОВА, А.А. МИХАЙЛОВ, В.В. ЗАЛЕТКИНА, О.В. ЧЕРНЫШЕВА_ТРАНСПОРТНЫЕ, МАГНИТНЫЕ И ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ .....	281
В.В. ПОПОВ, А.П. МЕНУШЕНКОВ, Ф.Э. ДУБЯГО, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ, Б.Р. ГАЙНАНОВ, А.А. ИВАНОВ, С.Г. РУДАКОВ, М.М. БЕРДНИКОВА, А.А. ПИСАРЕВ, Е.Б. МАРКОВА, Е.С. КУЛИКОВА, Н.А. КОЛЬШКИН, Е.В. ХРАМОВ, Я.В. ЗУБАВИЧУС, И.В. ЩЕТИНИН, С.М. НОВИКОВ, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ, Н.В. ОГНЕВСКАЯ, Н.А. ЦАРЕНКО, М.П. ГОЛОВАЩЕНКО_ВЛИЯНИЕ ВИДА РЗЭ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРЫ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМИТОВ $LnCrO_3$ .....	282
А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, Р.М. ЭМИРОВ, Ш. П. ФАРАДЖЕВ_СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ УВСО.....	283
С. В. РОГОЖКИН А. В. КЛАУЗ, А. А. ХОМИЧ, А. А. БОГАЧЕВ, А. А. НИКИТИН ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ НА АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДУО СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРООВ .....	284
О.В. РУБИНКОВСКАЯ, Д.В. ФОМИНСКИЙ, Р.И. РОМАНОВ, В.Ю. ФОМИНСКИЙ_ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК $MoS_x$ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА ФОТОКАТОДЕ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ $MoS_x/WSe_2$ .....	285
С.А. САВИНОВ, Ю.А. МИТЯГИН, И.П. КАЗАКОВ_ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО И НЕЛЕГИРОВАННОГО СЛОЕВ, В ОБЛАСТИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ .....	286

Ф. САФАРОВ,Х. СОАТОВА,У. ХАЛИЛОВ_ПОНИМАНИЕ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	287
И.Г.СЕРГИЕНКО, А.А. КАЗЬМИН_ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА В ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ РАЗРЯД НА СОСТАВ, СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ .....	288
Н.Н. СИТНИКОВ, С.В. ГРЕШНЯКОВА, И.А. ЗАЛЕТОВА_МИКРОСТРУКТУРА СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ .....	289
Е.Р. СЛЕПЦОВА, П.С. ДЖУМАЕВ_КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ В ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	290
С.Е. СОКОЛОВ, С.Т. СМИРНОВА, Т.Н. РОХМАНКА, Е.А. ГРУШЕВЕНКО СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАБУХАНИЯ ПОЛИ( <i>N</i> -ДЕЦИЛ МЕТИЛ СИЛОКСАНА) В ГАЗООБРАЗНЫХ <i>N</i> -АЛКАНАХ.....	291
В.Г. СРЕДИН, А.А.СТЕПАНЕНКО, А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, К.С. АНДРЕЙЧИКОВ ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА АНТИМОНИД ИНДИЯ - ПОВЕРХНОСТНЫЙ АНОДНЫЙ ОКИСЕЛ.....	292
А.С. СТАРИКОВСКИЙ, М.А. ОСИПОВ, И.А. РУДНЕВ_СРАВНЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ .....	293
И.С. СТЕПАНОВ, Л.И. БУДАЕВА, О.А. РАЗНИЦЫН, М.В. КАРПОВ, С.В. СТЕПАНОВ_КАКОВА ТОЛЩИНА ФРОНТА ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА?.....	294
А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОЕВА, С.Н. ЭШБОБОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ $NiSi_2$ .....	295
А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОЕВА, Н.М. МУСТАФАЕВА, З.В. КОЧНЕВА_МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ $NiSi_2$ , СОЗДАННЫХ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ .....	296
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, С.Т. АБРАЕВА, М.М.МАХМУДОВ, Н.А.МАРОЗИКОВА_ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА УПРУГООТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Ge ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ .....	297
И.А. ТЕРЕЩЕНКО, О.В.ТИХОНОВА_УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ НАНОСИСТЕМ КВАНТОВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ .....	298
У. ТУРАЕВА, У. ХАЛИЛОВ_КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ИНТЕРФЕЙСА $Ni_xO_y/Ni$ .....	299
Т.К. ТУРДАЛИЕВ, Х.Х. ЗОХИДОВ, Х.Б. АШУРОВ_ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКОЙ ПЛЕНКИ ZNO, ОСАЖДЕННОЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ .....	300
У.Б. УЛЖАЕВ, К.К. МЕХМОНОВ, Ш.Р. УРИНОВ, У.Б. ХАЛИЛОВ_ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА НА АДСОРБЦИЮ ВОДОРОДА НА УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ .....	301
А.Н. УРОКОВ, Х.Э. АБДИЕВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, Ё.С. ЭРГАШОВ, Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ_ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ $Ba^+$ НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ ВТСП МАТЕРИАЛОВ.....	302
Л.Ю. ФЕДОРОВ, И.В. КАРПОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОКСИДЕ МЕДИ, ОСАЖДЕННОМ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	303

Ф. ХАЙДАРОВ, Ф. САФАРОВ, У. ХАЛИЛОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАНОВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ НИКЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА .	304
Д.А. ХАЧАТРЯН, А.В. ШЕЛЯКОВ, Н.Н. СИТНИКОВ_ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА TiNiCu.....	305
А.А. ХОМИЧ, С.В. РОГОЖКИН, А.А. НИКИТИН, А.А. БОГАЧЕВ, А.А. ЛУКЬЯНЧУК, О.А. РАЗНИЦЫН, А.С. ШУТОВ, А.В. КЛАУЗ, Н.А. ИСКАНДАРОВ_УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ НАНОСТРУКТУРЫ РОССИЙСКИХ ДУО СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ.....	306
Д.Х. ХУСАНОВА, К.К. МЕХМОНОВ, Ж.В. ОЧИЛОВ, С.З. МИРЗАЕВ, У.Б. ХАЛИЛОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАННИХ СТАДИЙ РОСТА ОРГАНИЧЕСКИХ НАНОКРИСТАЛЛОВ: ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПЕРИЛЕНА И НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ .....	307
Д.М. ЧЕРНЫШОВ, Д.А. АКСЁНОВ_ДВОЙНЫЕ ФТОРИДЫ НАТРИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ: СТРУКТУРА, СТАБИЛЬНОСТЬ И ПРОВОДИМОСТЬ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ .....	308
А.Д. ЧЕРТОВА, И.О. ВАХРУШЕВА, Ю.Ю. КАПЛАНСКИЙ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ СРАВНЕНИЕ ПОКРЫТИЙ Hf-Mo-Si-B, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В РЕЖИМАХ DCMS И HIPIMS .....	309
Ф.И. ЧУДАРИН, А.Д. ЧЕРТОВА, Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕГМЕНТОВ LaB <sub>6</sub> ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ГЕТЕРОФАЗНОЙ МИШЕНИ MoSi <sub>2</sub> -MoB-ZrB <sub>2</sub> .....	310
Й. ШМАЙСНЕР, А.Н. ТЮЛЮСОВ, Н.О. ЕЛЮТИН_ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕННОГО ПУЧКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ГЕОМЕТРИЯХ ЛАУЭ И БРЭГГА В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ .....	311
П.И. ШУПАН, С.Д. ЛЕЩИК_ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ЭРОЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ.....	312
Р.М. ЭМИРОВ, М.Э. ИСХАКОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\alpha$ 2-Ti3Al.....	313
А. ЭРГАШЕВА, Д. БОЙМАМАТОВА, У. ХАЛИЛОВ_ЭКСТРАКЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНДОЭДРАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК.....	314
Секция УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	315
Ю. СЕНИЧЕВ, А. АКСЕНТЬЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ_ОСОБЕННОСТИ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ И МАГНИТОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЯХ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР.....	316
А. АКСЕНТЬЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю. СЕНИЧЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ФЛИППИНГА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К РЕЗОНАНСНОЙ ЭНЕРГИИ В ВОЗМУЩЁННОЙ СТРУКТУРЕ NiSA С БАЙПАСАМИ.....	317
С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю. СЕНИЧЕВ, А. АКСЕНТЬЕВ, А. МЕЛЬНИКОВ_ПРОХОЖДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ В ГАРМОНИЧЕСКОМ И БАРЬЕРНОМ ВЧ КОЛЛАЙДЕРА NiSA .....	318
С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ, К.С. САГАН_МАЛЫЙ КОМПТОНОВСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА 120 МэВ.....	319

Д.А. БОБЫЛЕВ, В.И. ШВЕДУНОВ НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НЦФМ.....	320
А. МЕЛЬНИКОВ, Ю. СЕНИЧЕВ, А. АКСЕНТЬЕВ, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ_СПИНОРНОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУР ТИПА ЗАМОРОЖЕННОГО И КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ .....	321
С.Ф. РЕШЕТНИКОВ, А.Г. АФОНИН, Е.В. БАРНОВ, А.Н. ВАСИЛЬЕВ, В.А. МАИШЕЕВ, В.В. МОЧАЛОВ, П.А. СЕМЕНОВ, Ю.А. ЧЕСНOKОВ_ВЫВОД ПУЧКА ПРОТОНОВ ВАРЬИРУЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ У-70 С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ ....	322
М.В. ВЛАДИМИРОВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.И. РАЩИКОВ_ТЕОРИЯ ОБЕДНЕНИЯ ФОТОКАТОДА В СВЧ ФОТОПУШКАХ: ТЕКУЩИЙ СТАТУС.....	323
И.В. РЫБАКОВ, В.В. ПАРАМОНОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОК ДРЕЙФА В СТРУКТУРАХ ИИ И SPR.....	324
А. СУХОЦКИЙ, Г. ВОЛЫНЕЦ, Е. ГУРНЕВИЧ, С.ГУСЕВ, Д. БЫЧЕНОК, М. ЛАЛАЯН, М. ГУСАРОВА, С. ПОЛОЗОВ_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВВОДА МОЩНОСТИ С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СВЯЗИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СВОЙСТВ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ.....	325
М.С. САРАТОВСКИХ, А.Н. ЗИМИН, Е.С. САРАТОВСКИХ, В.М. ГЛАДКОВ, А.Ю. ОРЛОВ, П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ОПЕРАТОРСКОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ НА УСКОРИТЕЛЕ ТИПР .....	326
Л.Ю. ОВЧИННИКОВА, А.П. ДУРКИН, В.В. ПАРАМОНОВ_ОСОБЕННОСТИ БЫСТРОЙ РЕГУЛИРОВКИ ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ .....	327
А. А. БАТОВ, Р. А. ЗБРУЕВ, Т. В. БОНДАРЕНКО, С. М. ПОЛОЗОВ, М. В. ЛАЛАЯН_РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МЭВ.....	328
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, С.А. ТУМАНОВ_РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА-ДРАЙВЕРА КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,8 ГГц .....	329
Д.К. ПУГАЧЕВ, С.Л. БОГОМОЛОВ, А.Е. БОНДАРЧЕНКО, К.И. БЕРЕСТОВ, К.И. КУЗЬМЕНКОВ, В.Н. ЛОГИНОВ, А.Н. ЛЕБЕДЕВ, В.Е. МИРОНОВ, Д.С. ПОДОЙНИКОВ_РАЗРАБОТКА ЭЦР-ИСТОЧНИКА ИОНОВ DESCRIS-5М ДЛЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЦ-140 .....	330
Д.С. СТЕПАНОВ, А.П. СКРИПНИК, Э.Я. ШКОЛЬНИКОВ_НАГРЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА ВАКУУМНОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ ПОРТАТИВНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА .....	331
И.Д. САДОФЬЕВ_РАДИАЦИОННЫЕ ПОЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА 6 ГЭВ .....	332
Н.В. МАРКОВ, А.А. АРТЮХОВ, В.А. ЗАГРЯДСКИЙ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, К.В. ПАВЛОВ, И.И. СКОБЕЛИН, В.С. СТОЛБУНОВ, Ю.Е. ТИТАРЕНКО_ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ И-2 В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	333
В.А. КИСЕЛЕВ, А.П. ЧЕРНЯЕВ, Ю.Д. УДАЛОВ, М.А. БЕЛИХИН, А.М. ДЕМИДОВА, С.Е. ГРИЦЕНКО_АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЯ КООРДИНАТ УЗКИХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА КЛИНИЧЕСКИХ ПЛАНОВ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ.....	334

А.С. САРИМСАКОВ, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ_РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ТИПР .....	335
Д.Л. ЛОГВИНОВ, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ_РАЗРАБОТКА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЫ УСКОРИТЕЛЯ ТИПР .....	336
В. ГАСЫМОВ, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, А. АКСЕНТЬЕВ, Ю. СЕНИЧЕВ_ПОДАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НА ПРЯМЫХ УЧАСТКАХ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОИСКА ЭДМ .....	337
А.Б. ЕРШОВ, Н.Ю. САМАРОКОВ, В.И. РАЩИКОВ, М.В. ЛАЛАЯН_РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ФОТОИНЖЕКТОРАХ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММАХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	338
К.А. КАРАВАЕВ_ДИНАМИКА ПУЧКА ИОНОВ $\text{Xe}^{28+}$ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA.....	339
С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ, Ю. СЕНИЧЕВ, В. КАЛИЛИН_ПРОХОЖДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ГАРМОНИЧЕСКОМ ВЧ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА У-70 .....	340
В.С. ДЮБКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕ ОСЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО СИНХРОТРОНА 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ СИЛА.....	341
П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. ЗИЯТДИНОВА, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН, Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ_ПРОЕКТ ДВУХПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ТИПР ДЛЯ ИМИТАЦИИ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ .....	342
А.Г. ВАСИЛЬЕВА, А.А. ДУРУМ, М.Ю. КОСТИН, А.В. ЛУТЧЕВ, В.А. МАИШЕЕВ, В.И. ПИТАЛЕВ, И.В. ПОЛУЭКТОВ, Ю.Е. САНДОМИРСКИЙ, М.Ю. ЧЕСНОКОВ, Ю.А. ЧЕСНОКОВ, А.А. ЯНОВИЧ_ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА 50-ГэВ-НЫХ ПРОТОНОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ С БОЛЬШИМ УГЛОВЫМ АКСЕПТАНСОМ .....	343
Р.О. ГАВРИЛИН, А.В. СКОБЛЯКОВ, А.О. ХУРЧИЕВ, А.В. КАНЦЫРЕВ, А.А. ГОЛУБЕВ, Д.Н. НИКОЛАЕВ, Д. ВАРЕНЦОВ, Р. БЕЛИКОВ_ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА СЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ .....	344
Д.А. САВИН, В.Т. БАРАНОВ, В.И. ТЕРЕХОВ_ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ В УСКОРИТЕЛЕ У-70 ИФВЭ .....	345
А.Р. КАРИМОВ, М.А. СОЛОМАТИН_ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В SEIR МОДЕЛИ .....	346
К.В. СУХАРЕВ, А.П. ВОРОБЬЕВ, С.Н. ГОЛОВНЯ, О.П. ТОЛБАНОВ, А.В. ТЯЖЕВ, А.Е. ВИННИК, М.С. СКАКУНОВ, А.Н. ЗАРУБИН_ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПФИРОВЫХ СЕНСОРОВ ДЛЯ ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ.....	347
Я.М. АБАКУМОВ_РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БАНЧЕРОВ Б1-Б3 .....	348
И.Р. КАЛИЕВА_РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ТРУБОК ДРЕЙФА ИЗ-ЗА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ В РЕЗОНАТОРАХ ИИ-ТИПА.....	349
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ, А.А. ТУМАНОВА_МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ ПИРС .....	350
В.И. КАМИНСКИЙ, С.В. МАЦИЕВСКИЙ_АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ЧЕРЕЗ МОСТ.....	351

В.В. ПАРАМОНОВ_СМЕЩЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТИПА N ИЗ ОКРЕСТНОСТИ РАБОЧЕЙ МОДЫ В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ SDTL .....	352
А.И. СЕМЕННИКОВ, А.Л. СИТНИКОВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ КОНСТРУКЦИЯ УСКОРЯЮЩЕГО ПЯТИ ЗАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА .....	353
А.Л. СИТНИКОВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ_ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С RFQ ДЛЯ ПРОЕКТА ЛУЧ-ПРОТОН .....	354
Н.Ф. ДРЕБЕЗОВА, А.А. ТУМАНОВА_МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ РАЗРЯД В РЕЗОНАТОРАХ- БАНЧЕРАХ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ.....	355
А.В. ГЛИНСКИЙ, А.В. НЕХОРОШЕВ, Х.М. КОЗЫРЕВ, А.Л. ГОНЧАРОВ_РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	356
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, О.А. ИВАНОВ, А.С. КРАСНОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЭКСТРАКЦИИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ .....	357
Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, А.А. ИСАЕВ, Е.А. МОРОЗОВА, А.Е. ШИКАНОВ_ПРОЕКТ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ .....	358
И.Ю. КОКОТКИН, Д.А. ТЕРЕНТЬЕВ_ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕДИАНА-2 МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ ФОКУСИРОВКИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРАХ .....	359
М.С. ДМИТРИЕВ, М.В. ДЬЯКОНОВ, А.С. КРАСНОВ_РАЗРАБОТКА ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ЭНЕРГИЯМИ 5 КЭВ И 7 МЭВ .....	360
А.В. МАКАРОВ, В.И. РАЩИКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЭЦР ИСТОЧНИКЕ КОДОМ WARP .....	361
А.А. МАЛЫШЕВ, А.В. КОЗЛОВ, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ_ДИПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА .....	362
И.Ю. НИКОЛАЙЧУК, Г.С. СЕДЫХ, В.Л. СМИРНОВ, М.М. ШАНДОВ_ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ В СИНХРОТРОНЕ .	363
М.С. ДМИТРИЕВ, А.В. ПРОКОПЕНКО, С.А. СМИРНОВ_РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ .....	364
Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ_ЛАБОРАТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ.....	365
Н.Ю. САМАРОКОВ, В.И. РАЩИКОВ, Т.В. БОНДАРЕНКО, А.А. БАТОВ, Р.А. ЗБРУЕВ ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ КОМПАНИИ ЕЛЕКТА.....	366
А.А. СУСЛЁНКОВ, К.А. СУХОВ, В.И. ТЕРЕХОВ_РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКОВ КОМПЛЕКСА У-1.5.....	367
Е.А. СЫЩИКОВ, И.В. ИВАНОВА, В.И. ТЕРЕХОВ_АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАБРОСА ВЫВОДИМОГО СГУСТКА ПУЧКА В АПЕРТУРУ СЕПТУМ МАГНИТА СМ24 УСКОРИТЕЛЯ У- 70.....	368



С.М. ПОЛОЗОВ, М.А. СОЛОМАТИН, В.Л. ШАТОХИН_УЧЕБНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ.....	369
А.С. ПАНИШЕВ, С.М. ПОЛОЗОВ, В.Л. ШАТОХИН_ОТКАЧКА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ОТ ИСТОЧНИКА ИОНОВ.....	370
А.А. ТАУСЕНЕВ, П.А. ЩЕГЛОВ, М.В. ЧАЩИН, А.В. ЛАЗАРЕВ, Т.А. СЕМЕНОВ, М.М. НАЗАРОВ_ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ГАЗО-КЛАСТЕРНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОМ УСКОРЕННЫХ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОНОВ .....	371
Секция ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ.....	372
С.В. БОГОМОЛОВ, И.А. ПАНФЕРОВА_ОДИН ТЕСТ ДЛЯ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ КОНВЕКЦИИ .....	373
А.И. САВВАТИМСКИЙ, В.Н. КОРОБЕНКО_ОТ ЖИДКОГО УГЛЕРОДА - К ЖИДКОМУ АЛМАЗУ .....	374
А.И. САВВАТИМСКИЙ, С.В. ОНУФРИЕВ, Н.М. АРИСТОВА_ИМПУЛЬСНЫЙ «ВЗРЫВНОЙ МЕТОД» ИССЛЕДОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ (ВКЛЮЧАЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ) ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДО 5500 К.....	375
П.А. ВЛАСОВ, А.Р. АХУНЬЯНОВ, В.Н. СМИРНОВ, А.В. АРУТЮНОВ, В.С. АРУТЮНОВ ПОЛУЧЕНИЕ СИНТЕЗ-ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОК H <sub>2</sub> O, CO, И CO <sub>2</sub> В КАЧЕСТВЕ ОКИСЛИТЕЛЯ В БЕСКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЯХ МЕТАНА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ИЗ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ .....	376
Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА_ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ НА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В ЛАМИНАРНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕНАХ .....	377
Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА, Г.Л. АГАФОНОВ, Э.К. АНДЕРЖАНОВ, А.С. БЕТЕВ, С.П. МЕДВЕДЕВ, А.М. ТЕРЕЗА, С.В. ХОМИК_Тос162443911 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ЗАДЕРЖКУ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВЫБОРА КИНЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА НА РОСТ ДАВЛЕНИЯ ПРИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИИ БЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ.....	378
В.А. СМЕТАНЮК, С.М. ФРОЛОВ, К.С. ПАНИН_ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	379
С.М. ФРОЛОВ, И. А. САДЫКОВ, В. А. СМЕТАНЮК, А. С. СИЛАНТЬЕВ, Ф. С. ФРОЛОВ, Я. К. ХАСЯК, Т.В. ДУДАРЕВА, В.Г. БЕКЕШЕВ, М.В. ГРИШИН, Е.К. ГОЛУБЕВ, Д. БАЙМУХАМБЕТОВА, В.Я. ПОПКОВА, А.И. ВЕЗЕНЦЕВ, А.Е. РАЗДОБАРИН, М.Н. ЯПРЫНЦЕВ, П.В. СОКОЛОВСКИЙ_ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЛУЗГИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА ИМПУЛЬСНЫМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СОРБЕНТОВ.....	380
А.С. СИЛАНТЬЕВ, И. А. САДЫКОВ, В. А. СМЕТАНЮК, С. М. ФРОЛОВ, Ф.С. ФРОЛОВ, Я.К. ХАСЯК ОБРАБОТКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ .....	381
К.А. БЫРДИН, К. А. АВДЕЕВ, И. О. ШАМШИН, В. С. АКСЕНОВ, С. М. ФРОЛОВ, П.А. СТОРОЖЕНКО_ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ВОДЯНОГО ПАРА И ТРИЭТИЛАЛЮМИНИЯ .....	382

Т.И. ЭЙВАЗОВА, И.О. ШАМШИН, В.С. ИВАНОВ, В.С. АКСЕНОВ, П.А. ГУСЕВ, С.М. ФРОЛОВ ВЛИЯНИЕ МЕСТА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ СЛОЕ ЭТИЛЕНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ .....	383
Т.А. РОСТИЛОВ, В.С. ЗИБОРОВ, Е.В. КРОНРОД, И.А. КУЗНЕЦОВ, Г.Г. ДОЛЬНИКОВ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ФИЗИЧЕСКОМ АНАЛОГЕ МАРСИАНСКОГО РЕГОЛИТА .....	384
М.А. ПАРАМОНОВ, Д.В. МИНАКОВ, П.Р. ЛЕВАШОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ .....	385
С.А. ГУБИН, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. КОЗЛОВА, И.В. МАКЛАШОВА_ХИМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЖИДКОГО БЕНЗОЛА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ В АТОМИСТИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ МАСШТАБАХ.....	386
А.А. ЕГОРОВ, Ю.А. БОГДАНОВА, И.В. МАКЛАШОВА, А.С. СМАЛЬ_ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ .....	387
А.А. СУРАЕВА, Ю.А. БОГДАНОВА_РАСЧЕТ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ .....	388
А.С. ШИПАКЦЯН, Д.Г. КВАШНИН_ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУАРОВЫХ ДИАМАНОВ .....	389
В.А. ПУШКОВ, Ю.В. БАТЬКОВ_ДЕФОРМИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ .....	390
О.В. КЛЮШИН, В.А. КУЗЬМИН_МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В МЁРЗЛЫЙ ГРУНТ.....	391
Т.А. АДИГАМОВА, М.В. АНТИПОВ, А.Б. ГЕОРГИЕВСКАЯ, Д.Н. ЗАМЫСЛОВ, М.О. ЛЕБЕДЕВА, А.Д. МАКОВ, К.Н. ПАНОВ, Д.А. ПОЛШКОВ, А.С. СОКОЛОВА, Б.И. ТКАЧЕНКО, Е.А. ЧУДАКОВ, И.В. ЮРТОВ, А.О. ЯГОВКИН, А.П. ЯВТУШЕНКО_ВЛИЯНИЕ ДВУХВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МАССОВО-СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИРОВАННОГО ОБРАЗЦА ИЗ СВИНЦА.....	392
А.Ю. НЕМЫГИН, Ю.В. БАТЬКОВ, Т.О. СКЛЯДНЕВА, А.М. ПОДУРЕЦ, И.Р. ТРУНИН, Е.Е. ШЕСТАКОВ_ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ .....	393
Р.А. МУРЗИН, В.Н. КНЯЗЕВ, А.Б. ГЕОРГИЕВСКАЯ, Р.А. ВОРОНКОВ_ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЛЯ УРС «ШНОСК» НЕРЕАГИРУЮЩЕГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ТАТЬ .....	394
И.В. МАКЛАШОВА, А.Д. ШЛЫКОВ_ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ JWL.....	395
С.О. БЕКБОСЫНОВА_ВЛИЯНИЕ N-ДОПИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМ .....	396
М. ТАСКЫН, С.Х. АКНАЗАРОВ_ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПРОТИВОМИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ФЕНОЛЬНО-КРЕЗОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ.....	397
Секция ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ.....	398

Е.П. БОГОЛЮБОВ, С.Э. ШОЛЕНИНОВ, Н.Н. ЩИТОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА ГЕЛИЯ ПРИ РАБОТЕ ИСКРО-ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ.....	399
С.В. ГАВРИШ, А.О. ПОТАПЕНКО, С.В. ПУЧНИНА, Р.М. УШАКОВ, П.А. ЧИЛИКИНА_ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ КОРОТКОДУГОВЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ.....	400
И.А. КАНЬШИН_КАРОТАЖНЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ТРУБКИ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ .....	401
А.Ф. КОВАЛЕНКО_РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН .....	402
В.А. КУГАВДА, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО_СТЕНД ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ 2D ТЕПЛОВЫХ КАРТ ИМПУЛЬСОВ ОТ НЕЙТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ.....	403
Е.И. КУДРЯВЦЕВ, А.В. ЛАЗУКИН_КОМПАКТНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК .....	404
А.А. КУЛИКОВ, А.О. МОРОЗОВ, А.В. ПРОКОПЕНКО_РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	405
Е.А. КУНИН, С.В. СЕРУШКИН_КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ.....	406
А.В. ЛАЗУКИН, А.А. МАМОНОВ_МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ .....	407
С.П. МАСЛЕННИКОВ_ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ МИШЕНЕЙ.....	408
В.Е. МЕЛЬНИКОВА, Г.В. ПАВЛИХИН, И.А. ХОЛОМОВ, Д.И. ЮРКОВ_РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОТОКОМ $10^{10}$ Н/С ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ.....	409
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ .....	410
П.Ф. КАРЦЕВ_ШИРИНА И ФОРМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АННИГИЛЯЦИИ ПАРАПОЗИТРОНИЯ В СОСТОЯНИИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА .....	411
Р.Д. ИВАНОВСКИХ_ДВУХФОТОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКОМ КОНДЕНСАТЕ ЭКСИТОНОВ И ПОЛЯРИТОНОВ ПО СХЕМЕ ХЕНБЕРИ БРАУНА И ТВИССА .....	412
К. Д. ДЯДЬКИН, Н. С. ВОРОНОВА_МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО ПОЛЯРИТОННОГО БОЗЕ-КОНДЕНСАТА С БАРЬЕРОМ .....	413
В.А. МАСЛОВА, Н.С. ВОРОНОВА_ТУННЕЛИРОВАНИЕ, НЕЛИНЕЙНАЯ САМОЛОКАЛИЗАЦИЯ И БОЗОННЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА В КОЛЬЦЕВОМ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОМ БОЗЕ-КОНДЕНСАТЕ .....	414
А.М. ГРУДИНИНА, Н.С. ВОРОНОВА_К ВОПРОСУ О БОЛЬШИХ НЕЛИНЕЙНОСТЯХ В ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	415
М. А. ПОСАЖЕНКОВ, Н. С. ВОРОНОВА_ИСКАЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ.....	416

В.И. БОНДАРЕНКО, М.Г.УРИН_СВОЙСТВА ЗАРЯДОВООБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-ДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ .....	417
М.Л. ГОРЕЛИК, М.Г. УРИН_ОПИСАНИЕ ШИРИНЫ ИЗОСКАЛЯРНОГО ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ .....	418
Е.Е. ГОРОДНИЧЕВ, В.В. МАРИНЮК_СИЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКАЛЯРНЫХ ВОЛН В НЕУПОРЯДОЧЕННОМ ОБРАЗЦЕ.....	419
М.П. МАЛАХОВ, А.М. ФЕДОТОВ_РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСАХ.....	420
Ю.В. СЕЛИВАНОВ, А.М. ФЕДОТОВ_АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ФИНАЛЬНОГО ЧИСЛА ЧАСТИЦ В МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАСКАДА .....	421
М.И. ГОЗМАН__ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛГЕБРЫ ЛИ ГРУППЫ ДИФФЕОМОРФИЗМОВ.....	422
Д. И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО_ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ АТОМОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ .....	423
А.И. АЛЕКСЕЕНКО, А.М. ФЕДОТОВ_РАСПАД СКАЛЯРНОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОЛЕ ПЛОСКОЙ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ.....	424
М.А. КАЛИНИЧЕВ, О.Е. ВАЙС, В.Ю. БЫЧЕНКОВ_ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СВЯЗЬ ПРИ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ .....	425
Ю.К. ГАГАРИН, Ф.А. КОРНЕЕВ_АВТОРЕЗОНАНСНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ.....	426
Е.С. ГОНЧАРОВ, А. М. КОТЕЛЬНИКОВ_МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ ВО ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЯХ МИШЕНЕЙ ТИПА «ЛАЗЕРНЫЙ ПАРНИК» ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ГЕНЕРАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ .....	427
А.Р. ПОЛЕТАЕВА, И.П. ЦЫГВИНЦЕВ_МОДИФИКАЦИЯ МНОГОГРУППОВОГО МЕТОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ О МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПУЧКЕ.....	428
Е. Е. ПЕГАНОВ, С. В. ПОПРУЖЕНКО_ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОГО КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ПЕТАВАТТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ .....	429
А.В. БЕРЕЗИН, В.Д. ЛЕВЧЕНКО, А.М. ФЕДОТОВ_МЕТОД РЕШЁТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА.....	430
Секция СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ.....	431
К.М. БАЛАХНЁВ, Д.В. БОРТКО, В.А. ШИЛОВ, О.С. ВАСИЛЬЕВ_ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНО-РАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА В ДИОДАХ ШОТТКИ.....	432
П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ_КОЭФФИЦИЕНТ СЕРОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ И ОКСИДОВ .....	433
Д.В. БОРТКО, В.А. ШИЛОВ, К.М. БАЛАХНЁВ, О.С. ВАСИЛЬЕВ_ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ТАНТАЛА РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ МИШЕНИ .....	434
А.П. ВЯЛЫХ, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ, А.В. СЕМЕНКО, Д.В. СУТЫРИН_МЕТОД ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА И ТЕМПЕРАТУРЫ АТОМОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОХЛАЖДЕНИИ В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ.....	435

А.А. ГОРОХИНА, К.А. ЭСЕНОВ, Д.В. СУТЫРИН_РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ .....	436
А.А. ДВУРЕЧЕНСКИЙ, А.С. ШУЛЬМИНА, Д.О. ТРЕГУБОВ, А.А. ГОЛОВИЗИН, Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А. МИШИН, К.Ю. ХАБАРОВА, В.Н. СОРОКИН, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ_РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА АТОМОВ ТУЛИЯ ДЛЯ ИМПЛАНТАЦИИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ РЕШЕТКУ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ.....	437
У.Н. КУРЕЛЬЧУК, О.С. ВАСИЛЬЕВ_ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТАМ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ D-МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ .....	438
В.А. ОРЛОВ_ОЦЕНКА КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЗАПУТАННЫХ МНОГОГРАННИКОВ И СВОП ТЕСТА .....	439
И.Л.ГЛУХОВ, А.А.КАМЕНСКИЙ, А.С. КОРНЕВ. Н.Л. МАНАКОВ, В.Д.ОВСЯННИКОВ, В.Г. ПАЛЬЧИКОВ_ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ РИДБЕРГОВСКИХ СВЧ-ПЕРЕХОДОВ В АТОМАХ: НОВЫЕ МЕТОДЫ В КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ.....	440
Д.И. ПРОВОРЧЕНКО, Д.А.МИШИН, Д.О. ТРЕГУБОВ, Н.Н. КОЛАЧЕВСКИЙ, А.А.ГОЛОВИЗИН_ПОДГОТОВКА АТОМОВ ТУЛИЯ В НАЧАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЧАСОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОСНОВНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 506.2 НМ.....	441
А.В. СЕМЕНКО, А.П. ВЯЛЫХ, Д.А. ПАРЁХИН, Д.В. СУТЫРИН_СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ.....	442
К.К. ТРИЧЕВ, П.В. БОРИСЮК, П.А. ЧЕРЕПАНОВ, Д.О. ТРЕГУБОВ_ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧАСОВОГО ПЕРЕХОДА В ИОНЕ SR88+ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ .....	443
В.А. ШИЛОВ, Д.В. БОРТКО, К.М. БАЛАХНЁВ, П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ_ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА И ОКСИДОВ ТАНТАЛА РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРОВ .....	445
К.М. БАЛАХНЕВ_ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ТАНТАЛА В ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНАХ .....	446
Секция ОБРАЗОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ: ВЫЗОВЫ, МЕТОДИКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ.....	447
К.Ф. БОРОДИН, Д.А. СИНИЦА, А.Н. ЕЛАГИНА, М.С. ТОЛСТОВ_ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАНИИ.....	448
А.А. ВОЛКОВ_АНАЛИЗ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ НИЯУ МИФИ К УЧАСТИЮ В ЧЕМПИОНАТАХ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МАСТЕРСТВА НА ПРИМЕРЕ КОМПЕТЕНЦИИ «КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».....	449
С.В. ГЕНИСАРЕТСКАЯ, А.А. СОЛОВЬЕВ_РАЗВИТИЕ КРИТИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА .....	450
А.Н. ЕЛАГИНА, К.Ф. БОРОДИН, Д.А. СИНИЦА, М.С. ТОЛСТОВ_МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА .....	451
Н.В. КОБЕЛЕВ, И.М. ПОЛОВИНКО, Г.П. ТЕРЕХОВ_ПРОЕКТНАЯ ПРАКТИКА ПО ЭЛЕМЕНТАМ АВТОМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКА».....	452

В.М. КОРОБОВ, Б.Е. ЛЕВКОВИЧ_ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НА СЛУЖБЕ «ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ».....	453
Б.Е. ЛЕВКОВИЧ, Г.П. ТЕРЕХОВ_ИНТЕГРИРОВАННЫЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН «ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ» .....	454
Я.С. ЛЯХОВА_ПОДГОТОВКА КВАНТОВЫХ ИНЖЕНЕРОВ: ОБЗОР ПРОФЕССИИ И ПРИМЕР ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ НИЯУ МИФИ.....	455
А.Н. МАКСИМОВА, Н.А. КЛЯЧИН, А.Ю. МАТРОНЧИК, С.С. МУРАВЬЕВ-СМИРНОВ, Е.М. СЕРЕБРЯКОВА, В.А. ШИЛОВ_ВИРТУАЛЬНЫЙ АНАЛОГ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА» .....	456
А.М. МАКУРЕНКОВ, Е.В. КАРАВАЕВА, А.И. КОВАЛЕВ МОДЕЛЬ КОМПЕТЕНЦИЙ В НАУЧНОЙ СФЕРЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ.....	456
7	
А.П. ПЛЁНКИН_ОПЫТ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ИНСТИТУТА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА .....	458
Н.В. НАЙМИТЕНКО, М.А. ПЛОТЯНСКАЯ, К.В. СЕРДЮК, В.Г. ФЕДЧЕНКО_РЕАЛИЗАЦИЯ СЕТЕВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УНИВЕРСИТЕТА И ПРЕДПРИЯТИЯ .....	459
Д.А. СИНИЦА, А.Н. ЕЛАГИНА, М.С. ТОЛСТОВ, К.Ф. БОРОДИН_СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА.....	460
А.А. СОЛОВЬЕВ, С.В. ГЕНИСАРЕТСКАЯ_ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ - ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СКВОЗНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ .....	461
Г.В. ТИХОМИРОВ_ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ПЕРЕДОВЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ШКОЛЫ» КАК ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕЗАГРУЗКИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ВЕДУЩИХ УНИВЕРСИТЕТАХ РОССИИ .....	462
П.Н. РЯБОВ, А.М. ШИЛОВА_ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ В УНИВЕРСИТЕТАХ.....	463
А.Д. ЕГОРОВ, А.Г. БОРОДИНА ВЛИЯНИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТУДЕНЧЕСКИХ КРУЖКОВ НА РАЗВИТИЕ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ.....	464

**Секция**  
**ЛАЗЕРНАЯ ФИЗИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– к.ф.-м.н., доцент  
Петровский Виктор Николаевич

Секретарь секции

– к.ф.-м.н.,  
Щекин Александр Сергеевич

E-mail: [AShchekin@mephi.ru](mailto:AShchekin@mephi.ru)

Е. АБЫЗОВА, И. ПЕТРОВ, И. БРИЛЬ, Д. ЧЕШЕВ, А. ИВАНОВ, М. ХОМЕНКО, А. АВЕРКИЕВ,  
М. ФАТКУЛЛИН, Д. КОГОЛЕВ, Е. БОЛЬБАСОВ, А. МАТКОВИЧ, Дж. ЧЕН, Р. РОДРИГЕС, Е.  
ШЕРЕМЕТ

*ФГАОУ ВО Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет, Томск, Россия*

## **ЛАЗЕРНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОКСИДА ГРАФЕНА В ПОЛИМЕРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Исследован механизм формирования композита из восстановленного оксида графена и ряда термопластичных полимеров при лазерной обработке в зависимости от мощности лазерного излучения. Выявлена связь между тепловыми свойствами полимерной подложки, механизмом формирования покрытия и функциональными свойствами нанокompозита в зависимости от мощности лазерного облучения.

E. ABYZOVA, I. PETROV, I. BRIL', D. CHESHEV, A. IVANOV, M. KHOMENKO, A. AVERKIEV,  
M. FATKULLIN, D. KOROLEV, E. BOL'BASOV, A. MATKOVIC, J. CHEN, R. RODRIGUEZ

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

## **LASER REDUCTION OF GRAPHENE OXIDE IN POLYMER ELECTRONICS**

The investigation delves into the mechanism governing the formation of a composite involving reduced graphene oxide and various thermoplastic polymers during laser processing, with a focus on the influence of laser power. The correlation between the thermal characteristics of the polymer substrate, the coating formation mechanism, and the functional attributes of the nanocomposite is unveiled in relation to the power of laser irradiation.

Исследования в области лазерной обработки для формирования композитов наноматериалов с полимерами постепенно развиваются благодаря точности, минимальному воздействию на материалы и настраиваемым свойствам. Уникальные свойства наноматериалов, такие как прочность, хорошая электропроводность и большая площадь поверхности, делают их перспективными для создания новых композитных материалов, которые позволят улучшить эффективность, механические свойства и работоспособность устройств для применения в качестве сенсоров или других электронных устройств [1]. С использованием лазерного излучения создаются разнообразные полимерные композиты, включающие углеродные нанотрубки, графен и наночастицы.

Одним из перспективных наноматериалов является оксид графена (ОГ), который при воздействии лазерного излучения может быть восстановлен до проводящего графеноподобного восстановленного оксида графена (ВОГ). В литературе представлено достаточно большое количество работ по лазерной интеграции наноматериалов в полимеры, однако в них отсутствует четкое понимание процессов формирования композита.

Целью данного исследования является изучение механизма формирования проводящего композита восстановленного оксида графена и ряда термопластичных полимеров в зависимости от мощности лазерного излучения, а также изучения его свойств.

Работа проводилась на термопластичных полимерах, таких как: полиэтилентерефталат (PET), полиэтилентерефталатгликоль (PETG), акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), нейлон, поли-L-молочная кислота (PLLA), термопластичный полиуретан (TPU), сополимер стирола и бутадиена (SBS) и поливинилиденфторид (PVDF). Поверхность полимера покрывалась водной дисперсией оксида графена с концентрацией 1 мг/мл, высушивалась и обрабатывалась лазером с длиной волны 438 нм, мощностями 24, 40, 55 и 78 мВт и скоростью обработки 25 мм/мин.

Стабильность образцов ВОГ/полимер подтверждалась проверкой сохранения проводимости слоя ВОГ после обработки ультразвуком. При воздействии с минимальной мощностью на высокоскоростных видеозаписях лазерной обработки поверхности видна тонкая линия ВОГ с небольшой модификацией оксида графена у краев из-за теплового воздействия на полимер. С увеличением мощности лазерного излучения увеличивается и ширина линии ВОГ. При использовании мощностей 55 и 78 мВт происходит абляция материала вдоль пути лазерного луча и последующее восстановление оксида графена у краев. В последнем случае ширина области абляции оказывается достаточно велика, и образцы остаются непроводящими, за исключением PVDF. При воздействии лазерного излучения на пленки ОГ и ВОГ свет поглощается, вызывая нагрев полимера, который становится жидким. ОГ восстанавливается до ВОГ, полимер при размягчении перемешивается с ВОГ, обуславливая формирование композита. При остывании композит затвердевает, обеспечивая электропроводящий слой ВОГ.

Таким образом, данное исследование раскрывает механизмы формирования проводящего композита ВОГ с термопластичными полимерами, а разработанная технология создания нанокompозита ВОГ и термопластичных полимеров позволяет управлять проводимостью и стабильностью изделия, регулируя мощность лазерного излучения [2].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-20027, <https://rscf.ru/project/22-12-20027> и финансировании со стороны администрации Томской области.

*Список литературы*

1. Sharma S., Sudhakara P., Omran A.A.B., Singh, J., Ilyas R.A. // *Polymers* 2021. Vol. 13, P. 2898.
2. Abyzova E., Petrov I., Bril' I., and others // *Polymers*. 2023. Vol. 15 (24). P. 4622.



## ВЛИЯНИЕ ИНДУЦИРОВАННОЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СТАЦИОНАРНОЙ СВЧ ПЛАЗМЫ НА СТРУКТУРУ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК

Исследовалась совместная лазерно-плазменная обработка высокотемпературных оксидных материалов. Обнаружено явление протекания электрического тока через газовые разряды между объёмными образцами диэлектрической холодной керамики во внешнем СВЧ-поле. С помощью оптической микроскопии в отражённом свете и по изменению ширины области когерентного рассеяния обнаружено снижение дефектности получаемого материала.

E.I. MEZENIN, V.A. STEPANOV  
Obninsk Institute of Nuclear Energy National Research Nuclear University MEPhI, Russia.

## INFLUENCE OF LASER RADIATION INDUCED STATIONARY MICROWAVE PLASMA ON THE STRUCTURE OF HIGH TEMPERATURE CERAMICS

Combined laser-plasma processing of high-temperature oxide materials was studied. The phenomenon of electric current flowing through gas discharges between volumetric samples of dielectric cold ceramics in an external microwave field was discovered. Using optical microscopy in reflected light and by changing the width of the coherent scattering region, a decrease in the defectiveness of the resulting material was detected.

Плазма на поверхности высокотемпературных оксидных керамик быть инициирована за счёт антенного эффекта [1] [2] в области лазерного облучения, когда нагретый диэлектрик приобретает ионную проводимость и достраивает собой СВЧ-антенну. В условиях лазерного (длина волны 10,6 мкм) плавления и кристаллизации оксида циркония, стабилизированного кальцием и оксида алюминия, развитая микроструктура керамики исчезает и образуется более гладкая поверхность при дополнительном воздействии СВЧ (2,45 ГГц) плазмы.

Микроструктура демонстрирует границы зёрен и субзёрен для лазерной обработки и гладкую поверхность с отсутствием яркого контраста границ для лазерно-плазменной обработки (рис. 1). Для оксида алюминия наблюдается схожая тенденция. Рентгенофазовый анализ исходного, обработанного лазером и лазерно-плазменным способом образцов показывает изменение зоны когерентного рассеяния, характерное для уменьшения дефектности структуры получаемого материала при использовании совместной лазерно-плазменной обработки (рис. 2).

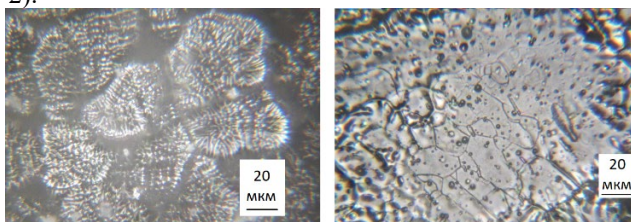


Рис. 1 – Ca-стабилизированный ZrO<sub>2</sub>, после лазерной (слева) и лазерно-плазменной (справа) обработки.

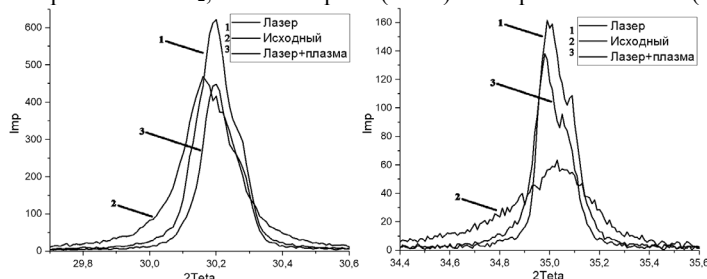


Рис. 2 – обработанный Ca-стабилизированный ZrO<sub>2</sub>, части спектра РФА.

В рамках продолжения работ по лазерно-плазменной обработке огнеупорных материалов, показано, что такая обработка уменьшает дефектность получаемых структур, что подтверждается результатом исследования образцов с помощью оптической микроскопии в отражённом свете и обнаружением уменьшения зоны когерентного рассеяния с помощью рентгеновской дифракции.

### Список литературы

1. Мезенин Е.И., Степанов В.А. Обработка высокотемпературных керамических материалов инициируемой антенным эффектом СВЧ-плазмой // Международный семинар "Структурные основы модифицирования материалов" МНТ-ХVII. Тезисы докладов. Обнинск. С. 28. – 2023.  
Мезенин Е.И., Степанов В.А. Индуцируемая лазерным излучением стационарная СВЧ плазма на поверхности высокотемпературных керамик // Российский химический журнал. Т. 68. - № 1. - с. 25-29 – 2024.

С.Е. МИНАЕВ<sup>2</sup>, Д.И. АШИХМИН<sup>1,2</sup>, Ю.К. СЕДОВА<sup>1</sup>,  
Н.В. МИНАЕВ<sup>1</sup>, В.И. ЮСУПОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ЛАЗЕРНАЯ БИОПЕЧАТЬ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Приведены результаты экспериментов по лазерно-индуцированному переносу микрокапель гидрогеля с помощью одиночных фемтосекундных импульсов без поглощающего покрытия на донорной подложке. Определены оптимальные параметры, обеспечившие стабильный процесс переноса. Приведены оценки физических факторов, действующих на живые микросистемы при лазерной биопечати.

S.E. MINAEV<sup>2</sup>, D.I. ASHIKHMIN<sup>1,2</sup>, Y.K. SEDOVA<sup>1</sup>,  
N.V. MINAEV<sup>1</sup>, V.I. YUSUPOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National research nuclear university MPhI, Moscow, Russia

## LASER PRINTING WITH FEMTOSECOND LASER PULSES

The results of experiments on laser-induced transfer of hydrogel microdroplets using single femtosecond pulses without an absorbing coating on a donor substrate are presented. The optimal parameters to ensure a stable transfer process were determined. Assessments of the physical factors acting on living microsystems during laser bioprinting are given.

Лазерная биопечать — это активно развивающаяся технология, применяемая в разных областях микробиологии и медицины для создания биоматериалов. Модификация данного метода – лазерная инженерия микробных систем (ЛИМС) - основана на лазерно-индуцированном переносе микрокапель гидрогеля с живыми системами [1,2]. Она успешно применяется для выделения трудно культивируемых микроорганизмов [3], что чрезвычайно важно для расширения банка известных культур [4], синтеза новых антибиотиков и биологически активных веществ. В стандартной конфигурации используются донорные подложки с поглощающим металлическим покрытием. Наночастицы, образованные разрушенным покрытием, оказывают значительное (часто негативное) влияние на живые системы [5,6]. Исключить этот недостаток поможет использование фс лазерных импульсов, эффективное поглощение которых может происходить непосредственно в гидрогеле.

Целью работы является обоснование возможности создания технологии лазерного биопринтинга с использованием фемтосекундных импульсов.

На рис. 1. представлена схема эксперимента и фотография установки. В работе использован фс лазер ( $E_{им} = 10 - 1000$  мкДж, 1032 нм, 200 фс) и фокусирующий объектив L Plan с N.A. = 0.4 ( $f = 10,4$  мм). Воздействие сфокусированным импульсом проводилось в слой гидрогеля толщиной 200 мкм, нанесенный на стеклянную подложку. Подложка располагалась в специальной кювете, изготовленной на 3D принтере, внутри которой поддерживалась необходимая влажность. Динамика микроструй геля изучалась с помощью скоростной съемки со скоростью 30 кадр/с (рис. 1).

Определены оптимальные режимы лазерного воздействия для стабильного переноса микрокапель. Установлено, что процесс переноса происходит лишь при скорости струи  $\geq 60$  м/с. Приведены оценки физических факторов, действующих на живые микросистемы при лазерной биопечати.

Работа частично поддержана грантом РФФ No. 20-14-00286 и проведена в рамках выполнения госзадания НИЦ «Курчатовский институт».

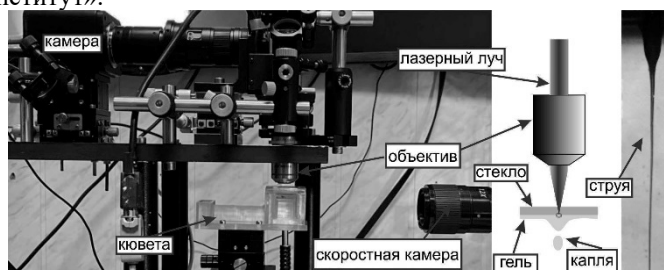


Рис.1. Экспериментальная установка, схема воздействия и кадр скоростной съемки со струей гидрогеля.

### Список литературы

1. V.I. Yusupov, M.V. Gorlenko, et. al // Laser Physics Letters. 2018. V. 15. N. 6. P. 462.
2. M.V. Gorlenko, E.A. Chutko, et. al // J. Biol. Eng. 2018. V. 12. P. 27.
3. V.S. Cheptsov, S.I. Tsykina, et. al // Int. J. Bioprint. 2019. V. 5. N. 1. P. 165.
4. T. V. Kochetkova, K.S. Zayulina et. al //Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2020. V. 70. N. 2. P. 1192-1202.
5. V.S. Cheptsov, E.S. Churbanova, et. al // Let. Appl. Microbiol. 2018. N. 67. P. 544-549.
6. E.V. Grosfeld, V.S. Zhigarkov, et. al // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23. P. 9823.

А.В. БАЛАШОВ<sup>1</sup>, А.А. ИОНИН<sup>2</sup>, И.О. КИНЯЕВСКИЙ<sup>2</sup>, Ю.М. КЛИМАЧЁВ<sup>2</sup>,

А.Ю. КОЗЛОВ<sup>2</sup>, О.А. РУЛЕВ<sup>2</sup>, Д.В. СИНИЦЫН<sup>2</sup>, А.В. ШУТОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## ТЕА СО<sub>2</sub> ЛАЗЕР С УФ ПРЕДЫОНИЗАЦИЕЙ

Запущен ТЕА СО<sub>2</sub> лазер с длительностями импульсов по полувысоте ~ 150 нс и пиковой мощностью до 1.5 МВт. Лазер реализован на базе коммерческой установки ЭЛИ-91М от эксимерного лазера путем подбора газовой смеси, замены оптических элементов и модернизации электродной системы.

A.V. BALASHOV<sup>1</sup>, A.A. IONIN<sup>2</sup>, I.O. KINYAEVSKIY<sup>2</sup>, YU.M. KLIMACHEV<sup>2</sup>,

A.YU. KOZLOV<sup>2</sup>, O.A. RULEV<sup>2</sup>, D.V. SINITSYN<sup>2</sup>, A.V. SHUTOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>The P.N. Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

## ТЕА СО<sub>2</sub> LASER WITH UV PREIONIZATION

A TEA CO<sub>2</sub> laser with FWHM pulse duration of ~ 150 ns and peak power up to 1.6 MW was launched. The laser was constructed on the basis of commercial excimer laser ELI-91M by selecting gas mixture, replacing optical elements and upgrading its electrode system.

Хорошо изученные СО<sub>2</sub> лазеры давно производятся промышленно для коммерческого использования. Однако, для некоторых приложений, например, литографических установок, генерирующих излучение на длине волны 13.5 нм, требуются ТЕА СО<sub>2</sub> лазеры с возможностью генерации коротких импульсов длительностью около 100 наносекунд с высокой пиковой мощностью [1]. Чтобы создать такие импульсы, СО<sub>2</sub> лазеры должны работать при высоком давлении активной среды, но ТЕА СО<sub>2</sub> лазеры с такими характеристиками не являются широкодоступными на рынке. В то же время эти СО<sub>2</sub> лазеры имеют схожую конструкцию системы предыонизации с некоторыми коммерчески доступными эксимерными лазерами, работающими при высоком давлении (см., например, [2]).

Целью нашего исследования было получение генерации на смесях для СО<sub>2</sub> лазера на основе серийно выпускаемой в нашей стране лазерной установки ЭЛИ-91М, предназначенной для работы с эксимерными смесями. Резонатор нашего лазера состоял из глухого сферического зеркала (радиус кривизны 3 метра) и плоскопараллельной пластины из ZnSe, используемой в качестве выходного зеркала. Расстояние между электродами СО<sub>2</sub> лазера составляло 17.5±0.2 мм. Временная форма импульсов измерялась с помощью фотодетектора РЕМ-Л-3, обладающего временным разрешением 0.5 нс. Сигнал от фотодетектора регистрировался осциллографом Tektronix MDO3054.

Активная среда нашего ТЕА СО<sub>2</sub> лазера с УФ предыонизацией состояла из газовой смеси СО<sub>2</sub>:N<sub>2</sub>:He=1:1:8 при общем давлении 1 атм. Максимальная пиковая мощность излучения лазерной установки в режиме одиночных импульсов достигала 0.7 МВт. Установка позволяла получать генерацию в импульсно-периодическом режиме. Пиковая мощность лазерной генерации с частотой 10 Гц составила 1.5 МВт. При этом длительность «хвоста» в импульсно-периодическом режиме оказывается меньше по сравнению с длительностью «хвоста» моноимпульса (см. Рис. 1). В предыдущих экспериментах [3] максимальная пиковая мощность лазерной генерации составляла 0.2 МВт. Увеличение пиковой мощности почти на порядок было достигнуто за счет уменьшения на 5 мм расстояния между электродами (см. Рис. 2).

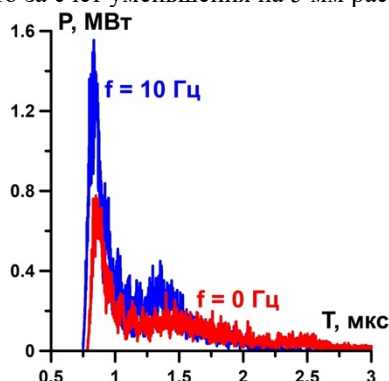


Рис. 1. Зависимость мощности СО<sub>2</sub> лазера от времени в моноимпульсном (f=0 Гц) и в частотном режимах генерации.



Рис. 2. Фотография разряда ТЕА СО<sub>2</sub> лазера с УФ предыонизацией.

### Список литературы

1. H. Mizoguchi et al., // Komatsu technical report. 2013. V. 59 NO.166.
2. Bergmann von H.M. // South African Journal of Science. 2005. V.101, P. 75.
3. Киняевский И.О., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. СО<sub>2</sub>-лазер атмосферного давления на основе установки для эксимерного лазера // XII Международная конференция по фотонике и информационное оптике. 2023. С. 96-97.

А.А. БУБНОВ, К.В. ФРОЛОВ, В.Ю. ТИМОШЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ ФОТОНАГРЕВ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ЗАГРУЖЕННОГО ЭКЗОГЕННЫМ КРАСИТЕЛЕМ МЕТИЛЕНОВЫМ СИНИМ, ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Рассмотрены оптические и фототермические свойства экзогенного красителя метиленового синего различной концентрации. Выполнена загрузка красителя в наночастицы пористого кремния. По фотолюминесценции была проведена оценка выхода препарата из наночастиц при воздействии непрерывного лазерного излучения длиной волны 660 нм. Исследовано влияние импульсного лазерного излучения длиной волны 532 нм и лазерно-индуцированного фотонагрева на величину выхода экзогенного красителя метиленового синего из пор НЧ.

A.A. BUBNOV, K.V. FROLOV, V.YU. TIMOSHENKO

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **LASER-INDUCED PHOTOHEATING AND PHOTOLUMINESCENCE OF POROUS SILICON NANOPARTICLES LOADED WITH EXOGENOUS DYE METHYLENE BLUE FOR BIOMEDICAL APPLICATION**

The optical and photothermal properties of the exogenous dye methylene blue of various concentrations are considered. The dye was loaded into porous silicon nanoparticles. Photoluminescence was used to assess the release of the drug from nanoparticles when exposed to continuous laser radiation with a wavelength of 660 nm. The influence of pulsed laser radiation with a wavelength of 532 nm and laser-induced photoheating on the release of the exogenous dye methylene blue from the pores of NPs was studied.

Быстрое развитие нанотехнологий позволяет активно интегрировать их в различные наукоемкие области: биотехнологии, фармацевтика, биоинженерия и т.д. [1]. Среди всего многообразия применений стоит отметить, что в последние годы использование наночастиц (НЧ) в медицине становится одним из главных трендов данной отрасли [2]. Изготовление НЧ как доставщиков лекарственных препаратов имеет ряд преимуществ: снижение побочных эффектов за счет таргетности и увеличение точности дозирования лекарств при доставке [3]. При этом для целей доставки выгодно использовать пористые наноструктуры, которые способны удерживать лекарственный препарат и высвободить его в определенном месте организма. Наиболее распространенным материалом, который является основой для таких наноконтейнеров, стал кремний (Si). Среди форм Si для доставки лекарственных препаратов используют пористый кремнезём (pSiO<sub>2</sub>) и пористый кремний (pSi) [1,4]. Однако pSi по сравнению с pSiO<sub>2</sub> обладает способностью к фотонагреву при воздействии лазерного излучения, что позволяет применять его не только в качестве наноконтейнера, но и фотоагента локальной лазерно-индуцированной гипертермии [5]. Последнее свойство дает возможность рассматривать pSi в роли доставщика экзогенного красителя метиленового синего, который имеет потенциал для широкого применения в интраоперационной навигации [6].

Целью настоящей работы является исследование лазерно-индуцированного нагрева и фотолюминесценции нанокompозита на основе НЧ pSi, загруженного экзогенным красителем метиленовым синим.

pSi был получен методом электрохимического травления монокристаллического Si (удельное сопротивление 0.005–0.01 Ом·см, электролит HF + этанол в отношении 1:1, плотность тока 50 мА/см<sup>2</sup>). После проводилось его механическое дробление в спирту для получения НЧ pSi. Далее была проведена загрузка метиленового синего (концентрация 11 мг/мл) в pSi НЧ (концентрация 20 мг/мл). После 4-х фазной очистки методом центрифугирования полученную суспензию загруженных pSi НЧ (объем 200 мкл, концентрация 0.15 мг/мл) облучали непрерывным лазерным излучением мощностью 43 мВт (длина волны 660 нм) и диаметром пятна лазерного луча 4 мм. Для усиления выхода красителя из пор НЧ был использован лазер, работающий в импульсном режиме с длиной волны 532 нм и длительностью импульса <15 нс (максимальная средняя мощность < 20 Вт, диаметр пятна лазерного луча 2 мм). Фотонагрев был измерен тепловизором FLIR-C3 (точность 0.01 °С, частота кадров 9 Гц).

В результате проделанной работы были получены зависимости выхода красителя метиленового синего от времени воздействия лазерного излучения. Было установлено, что слабосвязанный краситель выходит из НЧ в течение 20-30 мин после начала нагрева. Величина выхода составляла 20-30 % при нагреве 3-4 °С. Далее при воздействии на образец импульсным лазерным излучением в комбинации с непрерывным наблюдается рост выхода красителя более чем в 2 раза. В тоже время нагрев составил 5-6 °С. Общий выход красителя за все время облучения составил 0.4 – 0.6 нмоль. Наблюдается усиление выхода красителя из пор НЧ за счет лазерно-индуцированного нагрева.

Таким образом, полученный результат подтверждает предположение о том, что за счет лазерно-индуцированного фотонагрева можно повысить выход красителя метиленового синего в области накопления препарата в организме человека, что усиливает локальную фотогипертермию и фотолюминесценцию.

*Список литературы*

1. Haidary S. M.; Córcoles E. P.; Ali N. K. Nanoporous Silicon as Drug Delivery Systems for Cancer Therapies // *Journal of Nanomaterials*. 2012, № 2012, p. 15.
2. Mitchell, M.J., Billingsley, M.M.; Haley, R.M. Engineering precision nanoparticles for drug delivery // *Nat Rev Drug Discov*. 2021, № 20, p. 101–124.
3. Jia, L.; Zhang, P.; Sun, H.; Dai, Y.; Liang, S.; Bai, X.; Feng, L. Optimization of Nanoparticles for Smart Drug Delivery: A Review // *Nanomaterials*. 2021, № 11(11), 2790.
4. Kim, J. H.; Cha, B.J; Kim, Y.D.; Seo, H.O. Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on the Fe-oxide nanoparticles embedded in the mesoporous SiO<sub>2</sub> // *Advanced Powder Technology*. 2020, № 31 (2), p. 816-826.
5. Fedorov, A.S.; Teplinskaia, A.S. Thermal Properties of Porous Silicon Nanomaterials // *Materials*. 2022. № 15(23), 8678.
6. Cwalinski, T.; Polom, W.; Marano, L.; Roviello, G.; D'angelo, A.; Cwalina, N. Methylene blue-current knowledge, fluorescent properties, and its future use // *J. Clin. Med*. 2020. № 9(11), 3538.

А.В.ЛОБАНОВ, А.В. МИХАЙЛЮК, А.П. МЕЛЕХОВ, М.С. ДУДАЛИН, К.И. ВОЛКОВ, Д.Е. РАДЫГИН, А.П. КУЗНЕЦОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ЗАДАЮЩИЙ ГЕНЕРАТОР И СИСТЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА “ЭЛЬФ”

Разработана система формирования опорного импульса и схема предварительного усиления наносекундного канала лазерного комплекса “ЭЛЬФ”. Осуществлён монтаж тракта предварительного усиления в соответствии с разработанной схемой.

A.V. LOBANOV, A.V. MIKHAYLYUK, A.P. MELEKHOV, M.S. DUDALIN, K.I. VOLKOV, D.E. RADYGIN, A.P. KUZNETSOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MASTER OSCILLATOR AND PRE-AMPLIFICATION OF THE “ELF” LASER'S NANOSECOND CHANNEL

A reference pulse generating system and a scheme for pre-amplification of the “ELF” laser's nanosecond channel have been developed. The installation of the pre-amplification path was carried out in accordance with the developed scheme.

Лазерный комплекс ELF, создаваемый в настоящее время в НИЯУ МИФИ, будет включать в себя два лазерных канала: наносекундный (3-10 нс) и субпикосекундный, - работающих независимо. Оптическая схема наносекундного канала основывается на оптической схеме установки Луч (РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия), применяемой также при проектировании мегаджоульной лазерной установки УФЛ-2М. Оптическая схема субпикосекундного канала до настоящего времени не определена, однако установлено, что будет использован принцип усиления chirпированных импульсов, а на финальном каскаде усиления будет использоваться единый с наносекундным каналом усилительный блок.

В качестве задающего генератора (ЗГ) наносекундного канала был выбран лазерный диод с центральной длиной волны 1,053 мкм под управлением высокоскоростного драйвера Aerodiode Shaper (США), позволяющего управлять длительностью и формой лазерного импульса. Вывод излучения – волоконный.

Поскольку излучение на выходе из волокна имеет низкую энергию, был установлен регенеративный усилитель с диодной накачкой и активным элементом из Nd:YLF, повышающий энергию на несколько порядков [1], изготовленный в ИПФ РАН.

Дальнейшее усиление лазерного импульса строится по классической схеме прямого усиления на стержневых активных элементах. Для проектирования усилительного тракта было проведено моделирование оптической схемы в программном комплексе Zemax, определён ход лучей и оптимальные оптические отрезки (рис. 1). Оценка изменения пучка по мере его прохождения вдоль оптической оси проводилась в программе Fresnel. Окончательная схема, разработанная на основе данных, полученных в результате моделирования, представлена на рисунке 2.

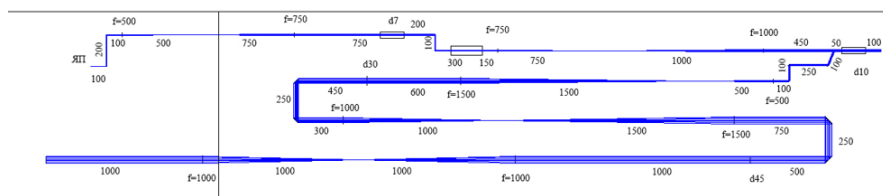


Рис. 1. Моделирование оптической схемы в Zemax.

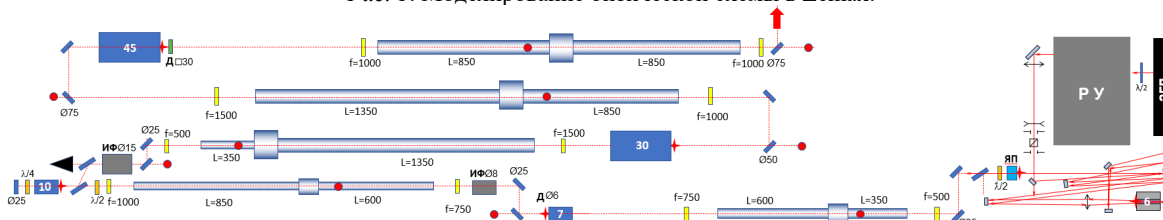


Рис. 2. Схема расположения оптических элементов и трассировки лучей.

Как видно из схемы, через квантроны 6 и 10 (номера соответствуют сечениям активных элементов) осуществляются несколько проходов пучка (4 и 2 соответственно). В качестве активных элементов квантронов системы усиления (всех, кроме 6, где используется Nd:YLF) предполагается использование стержней из фосфатного неодимового стекла, имеющего максимум люминесценции на длине волны 1,055 мкм, в то время как Nd:YLF имеет максимум на 1,055 мкм, результатом чего будет расширение спектра излучения лазера.[2]

Расчётная энергия на выходе системы предварительного усиления составит 10 Дж, и является оптимальной для дальнейшего усиления в многокаскадном усилительном блоке и получения на выходе из него лазерного пучка энергией 8 кДж на первой и 4 кДж на второй гармониках соответственно с частотой следования 1 импульс в 30 минут.

### Список литературы

1. Патент RU2618498 С2, опубл. 02.03.2021 Бюл.№7/ Кузнецов И.И., Мухин И.Б. с соавт.
2. Li Yan; Lei Ding Intracavity injection lasing in a hybrid neodymium laser // App. Phys. Lett. 1995. Vol. 67 (25) P. 3679–3681.

Л.П. ВЫЛОМОВ, О.И. ГОРЧАКОВ, А.Е. ДАНИЛОВ, Л.А. ДУШИНА, А.Е. ПЛОХОТНИК,  
К.В. СТАРОДУБЦЕВ

*ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл., Россия*

## **СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАССЕЯННОГО МИШЕНЬЮ ИЗ МАЛОПЛОТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В исследованиях поведения пористого материала под действием мощного лазерного излучения применяется система регистрации его рассеянного света на установке «Луч». Регистрация интенсивности рассеянного излучения от мишени осуществляется точно с помощью волоконных коллиматоров, размещенных в камере взаимодействия, и в широком телесном угле, перехватываемом входным объективом. Измерительными приборами являются фотохронографы, работающие в режиме щелевой развертки.

L.P. VYLOMOV, O.I. GORCHAKOV, A.E. DANILOV, L.A. DUSHINA, A.E. PLOHOTNIK, K.V.  
STARODUBTSEV

*RFNC-VNIEF, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia*

## **POROUS MATERIAL SCATTERED LASER RADIATION SPACE-TIME PARAMETERS MEASUREMENT SYSTEM**

To research porous material behavior in a high power laser interaction, the measurement system is used on the «Luch» laser complex. The intensity of the scattered laser radiation from the target is measured with some fiber collimators placed into the vacuum chamber and in wide solid angle intercepted by input lens. The measuring devices are streak cameras.

Для регистрации оптических сигналов в экспериментах по программам лазерного термоядерного синтеза используется скоростной фотохронографический регистратор. Современные версии обладают высоким временным и пространственным разрешениями и большим динамическим диапазоном [1,2].

На лазерной установке «Луч» [3] проведена серия экспериментов по определению времени гомогенизации пористого материала под действием лазерного излучения разной интенсивности. Мишени с различными параметрами (плотности, диаметра пор и содержания золота) облучались лазером с длиной волны 527 нм в камере взаимодействия. Под действием лазерного излучения происходило преобразование пористой структуры мишени в квазиоднородную, способствующая выравниванию пространственного профиля интенсивности пятна облучения лазера [4,5]. Окончание процесса преобразования можно определить по моменту существенного изменения интенсивности рассеянного излучения.

Регистрация интенсивности рассеянного излучения осуществлялась точно с помощью коллиматоров четырехканальной волоконной оптической системы на базе волоконно-оптической линии связи, размещенных в камере взаимодействия. Выходы волокон состыкованы с щелью фотохронографа, работающего в режиме щелевой развертки. А также измерялась интенсивность рассеянного мишенью назад излучения в широком телесном угле, перехватываемом входным объективом. Это излучение проецировалось в апертуру другого фотохронографа с щелевой разверткой и на калориметр. Таким образом, возможно регистрировать во временном интервале пространственно-временное распределение энергии лазерного излучения, рассеянного мишенью.

### *Список литературы*

1. Душина Л.А., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н. и др., Регистрация профиля фронта лазерного импульса с пикосекундным разрешением и большим динамическим диапазоном на многоканальных установках // Приборы и техника эксперимента. 2019. №2. С. 219-222.
2. Корниенко Д.С., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н. и др., Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // Приборы и техника эксперимента. 2014. №2. С. 1-12.
3. Voronich I.N., Galakhov I.V., Garanin S.G. et al. // Quantum Electron. 2003. Vol. 33(6). P. 485.
4. С.А. Бельков и др. Ударная передача давления твердому веществу в мишени с пористым поглотителем излучения мощного лазерного импульса. ЖЭТФ. 161. 3. 403-413 (2022).
5. S.Y. Gus'kov et al. Interaction of a high-power laser pulse with supercritical-density porous materials. Quantum Electronics. 30. 3. 191-206 (2000).

К.А. ГАЛЮК<sup>1,2</sup>, Б.Д. ОВЧАРЕНКО<sup>1</sup>, А.А. УШАКОВ<sup>1</sup>, В.В. БУКИН<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО МОДУЛЯ С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА Nd<sup>3+</sup>:YAG

С целью оптимизации поглощения излучения накачки лазерного модуля (квантрона) с поперечной диодной накачкой разработана математическая модель оптической накачки. Методом непоследовательной трассировки лучей рассчитаны пространственное распределение мощности поглощенного излучения в поперечном сечении активного элемента и эффективность накачки. Разработана методика увеличения эффективности накачки и однородности поглощения излучения накачки в сечении активного элемента. Построена численная модель коэффициента усиления активного элемента.

K.A. GALYUK<sup>1,2</sup>, B.D. OVCHARENKO<sup>1</sup>, A.A. USHAKOV<sup>1</sup>, V.V. BUKIN<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MODEL OF A SOLID-STATE LASER MODULE WITH TRANSVERSE DIODE PUMPING OF Nd<sup>3+</sup>:YAG ACTIVE ELEMENT

In order to optimize the pump radiation absorption of a laser module (quantron) with transverse diode pumping, a mathematical model of optical pumping has been developed. Using the method of non-sequential ray tracing, the spatial distribution of the power of absorbed radiation in the cross section of the active element and the pumping efficiency were calculated. A technique has been developed to increase the pump efficiency and the uniformity of absorption of pump radiation in the cross section of the active element. A numerical model of the gain factor of the active element has been constructed.

В данной работе обсуждаются математическое и численное моделирование поперечной диодной накачки твердотельного стержневого активного элемента в лазерном модуле (квантроне). Построение модели проводилось в программе оптического проектирования Zemax методом непоследовательной трассировки лучей. Данная модель позволяет проводить оптимизацию геометрии конструкции квантрона с целью повышения выходных характеристик лазерной системы. Методы оптимизации квантрона зависят от выполняемой функции квантрона, а именно усиление и генерация лазерного излучения. Целью данной работы является повышение эффективности накачки активного элемента квантрона-лазера и увеличение однородности распределения мощности поглощенного излучения накачки по поперечному сечению активного элемента квантрона-усилителя.

В качестве активного элемента применяется лазерный кристалл Nd<sup>3+</sup>:YAG с однопроцентной концентрацией примесных ионов Nd. Оптическая накачка осуществляется лазерными диодными решетками НПП «Инжент». В результате численного эксперимента с математической моделью получено пространственное распределение мощности поглощенного излучения накачки в поперечном сечении активного элемента (рис. 1.а) и соответствующее поперечное сечение данного распределения (рис. 1.б).

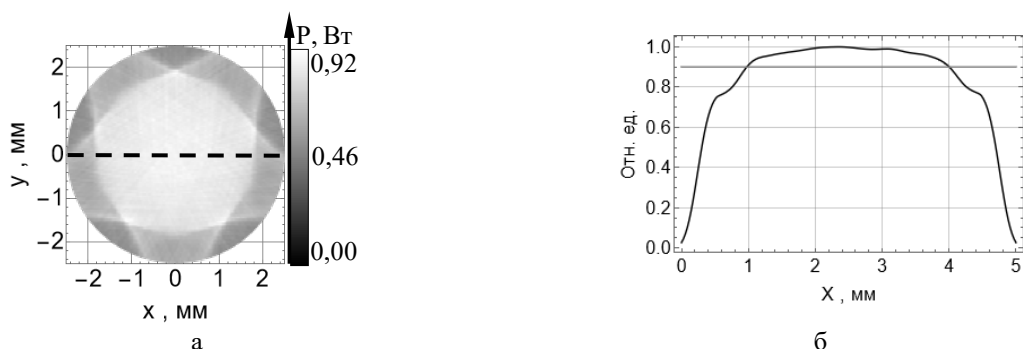


Рис.1. Пространственное распределение мощности поглощенного излучения накачки  
а) по поперечному сечению; б) по горизонтальному разрезу поперечного сечения активного элемента

По данным распределениям проведен расчёт эффективности накачки и получена оценка однородности поглощения излучения. Данные параметры рассчитаны для модели квантрона с различными расстояниями между лазерными диодными решетками и центром активного элемента; толщиной кварцевой трубки и протока охлаждающей жидкости; наличием отражающих поверхностей и цилиндрических линз; сдвигом диодных излучателей. Для контроля выходных характеристик модели квантрона: коэффициента усиления и запасенной энергии – построена численная модель коэффициента усиления Nd<sup>3+</sup>:YAG.



## ФОРМИРОВАНИЕ МИКРООТВЕРСТИЙ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КРЕМНИИ ПЕРКУССИОННЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ СВЕРЛЕНИЕМ

Рассмотрены базовые принципы лазерного сверления. Проведено исследование влияния параметров лазерного излучения на конусность формируемых отверстий при перкуSSIONном лазерном сверлении с использованием статистических методов. С помощью дисперсионного анализа рассчитано влияние каждого из рассматриваемых параметров.

N.V. GRECHIKHIN, A.S. SHCHEKIN, V.N. PETROVSKIY, A.R. BURKHANOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FORMATION OF MICROHOLES IN MONOCRYSTAL SILICON BY PERCUSSION NANOSECOND LASER DRILLING

The basic principles of laser drilling are considered. A study was carried out of the influence of laser radiation parameters on the taper of formed holes during percussion laser drilling using statistical methods. Using variance analysis, the influence of each of the parameters under consideration was calculated.

Основной проблемой лазерного сверления является конусность получаемых отверстий. Исходя из этого, целью данной работы является нахождение оптимального режима сверления кремния МОРА (Master Oscillator Power Amplifier) лазером, для получения минимального угла конусности отверстий.

В работе представлен анализ конусности отверстий в пластине кремния, получаемых наносекундным лазерным сверлением. Измерение параметров получаемых отверстий проводится на оптическом микроскопе Olympus.

Для проведения исследования влияния входных параметров системы на выходные, часто используют методику планирования эксперимента Тагучи[1]. Она является разновидностью факторных экспериментов. Данный вид эксперимента позволяет значительно уменьшить время, затраченное на исследование. Полный факторный эксперимент представляет собой полный анализ влияния каждого входного параметра на определенный выходной параметр системы. Методика Тагучи позволяет сократить количество экспериментов путем составления ортогональных матриц планирования эксперимента. Выходным параметром системы в данном исследовании является угол конусности  $\theta = \arctg\left(\frac{D1-D2}{2t}\right)$ , где D1 и D2 – диаметры входного и выходного отверстий соответственно, t – толщина пластины. С помощью программы MINITAB было рассчитано влияние средней мощности лазерного излучения, частоты следования импульсов и времени экспозиции на конусность получаемых отверстий (рис. 1). Для достоверности результатов, каждый эксперимент проводился 5 раз, и полученная конусность является усредненной по пяти отверстиям.

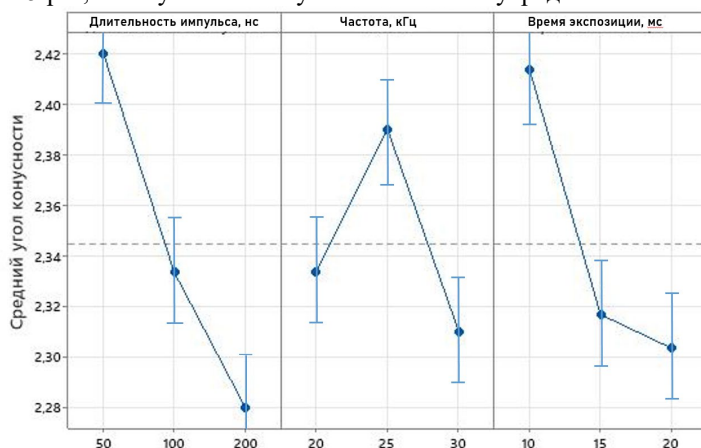


Рис. 1. График влияния параметров лазерного излучения на средний угол конусности

Дисперсионный анализ показал, что наибольшее влияние на конусность отверстий оказывает длительность импульса и время экспозиции. Оптимальный набор рассматриваемых параметров лазерного излучения для получения минимального угла конусности есть длительность импульса - 200 нс, частота следования импульсов - 30 кГц, время экспозиции - 20 мс. При данных значениях факторов конусность получаемых отверстий является минимальной. Полученные результаты можно применить на практике непосредственно для регулировки параметров лазерного излучения с целью изготовить отверстия с минимальной конусностью, а также для дальнейших исследований в целях улучшить параметры получаемых отверстий.

### Список литературы

1. Roy RK (2010) A primer on the Taguchi method. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn.

Я.В. ГРУДЦЫН, А.В. КОРИБУТ, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, В.И. КОВАЛЕВ, А.А. ИОНИН  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва, Россия*

## ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ЧИРПИРОВАННОГО ИМПУЛЬСА ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КАРБОНАТЕ КАЛЬЦИЯ С ЗАТРАВКОЙ УЗКОПОЛОСНЫМ НАНОСЕКУНДНЫМ Nd:YAG ЛАЗЕРОМ

Продemonстрировано ВКР-преобразование чирпированных лазерных импульсов импульсов Ti:сапфирового лазера с внешней затравкой наносекундным импульсом Nd:YAG-лазера. Эффективность преобразования составила ~20%.

Y.V. GRUDTSYN, A.V. KORIBUT, I.O. KINYAEVSKY, V.I. KOVALEV, A.A. IONIN  
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## STIMULATED RAMAN SCATTERING OF CHIRPED TI:SAPPHIRE LASER PULSE IN CALCIUM CARBONATE SEEDED BY NARROWBAND NANOSECOND Nd:YAG LASER

The SRS conversion of chirped laser pulses from a Ti:sapphire laser with an external seed by a nanosecond pulse from a Nd:YAG laser has been demonstrated. The conversion efficiency was ~20%.

В [1, 2] ВКР чирпированных лазерных импульсов осуществлялось при затравке излучением суперлюминесценции многопроходного Ti:сапфирового усилителя. Такая схема обладает простотой по сравнению с другими схемами, например [3], поскольку усиление реализуется за один проход лазерного импульса через ВКР-кристалл. Таким образом, схема ВКР-преобразователя (усилителя) чирпированных лазерных импульсов с внешней затравкой выглядит перспективно. Поэтому в данной работе изучается ВКР чирпированных импульсов Ti:сапфирового лазера с внешней затравкой наносекундным импульсом широко-распространенного Nd:YAG-лазера.

Эксперименты проводились в Центре лазерных и нелинейно-оптических технологий Физического института им. Лебедева РАН с фемтосекундным Ti:сапфировым лазером (ООО «Авеста проект», Россия) ( $\lambda \sim 950$  нм, 100 фс) и наносекундным Nd:YAG лазером (SOLAR Laser Systems, Беларусь).  $\lambda = 1064$  нм, энергия до 12 мДж, длительность 20 нс). Импульсы Ti:сапфирового и Nd:YAG лазеров были совмещены по пространству и времени и далее фокусировались сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 80 см в кристалл  $\text{CaCO}_3$ . Образец кристалла  $\text{CaCO}_3$  длиной 3 см устанавливался на расстоянии 15 см за фокусом. Спектр лазерного импульса, прошедшего через кристалл  $\text{CaCO}_3$ , направлялся в спектрометр АСП-150 (ООО «Авеста-проект», Россия) (рис 1). Для измерения энергетических характеристик с помощью измерителя энергии Ophir, ВКР компонента выделялась дифракционной решеткой.

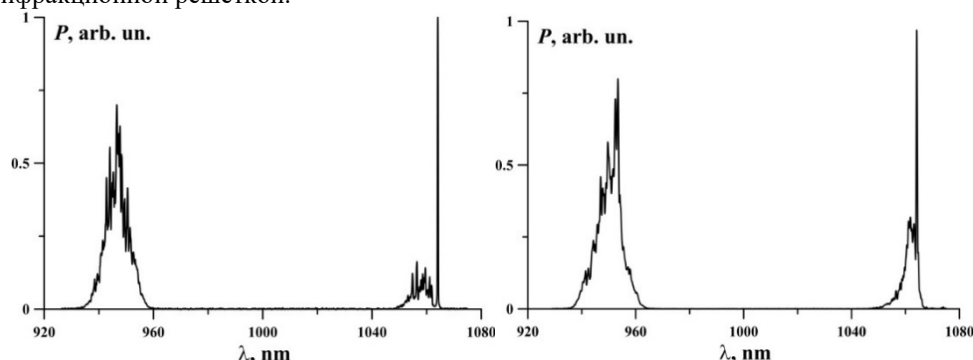


Рис. 1. Спектры Ti:сапфирового и Nd:YAG лазеров (а); Для фемтосекундного импульса с центральной длиной волны 947 нм (б) Для фемтосекундного импульса с центральной длиной волны 955 нм

Для режима наилучшего согласования по длине волны установлено, что высокая энергия затравочного импульса не требуется, увеличение энергии затравочного импульса с ~1 мДж до ~22 мДж привело к увеличению энергии импульса ВКР лишь в 2 раза. Максимальная эффективность ВКР-преобразования достигала 20%. Это сопоставимо с другими схемами ВКР чирпированных импульсов и достаточно для применения в преобразователях разностной частоты [2]. Насыщение усиления при относительно невысоком (~20%) КПД может быть связано с активацией других нелинейных эффектов, нарушающих ВКР и требует дальнейшего исследования.

### Список литературы

1. Kinyevskiy, I. O., Koribut, A. V., Seleznev, L. V., and others // Optics Communications, 2023, 546, 129800.
2. Kinyevskiy, I. O., Koribut, A. V., Seleznev, L. V., and others // Optics & Laser Technology, 2024, 169, 110035.
3. Grigsby, F. B., Dong, P., and Downer, M. C // JOSA B, 2008, 25(3), 346-350.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10068, <https://rscf.ru/project/22-79-10068/>.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ТЕХНОЛОГИЕЙ ЛАЗЕРНОЙ ГИДРОРЕЗКИ

Рассмотрен процесс формирования сквозного реза в различных твёрдых материалах при воздействии лазерного излучения, распространяющегося до заготовки по ламинарной струе воды. Проведены исследования полученных образцов на основные параметры качества реза (шероховатость поверхности, размер грата, отклонение кромки реза от перпендикулярности, размер зоны термического влияния).

G.N. DUBROVIN, P.E. SAMARIN  
NTO «IRE-Polus», Fryazino, Russia

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF SEPARATING MATERIALS BY LASER WATER CUTTING TECHNOLOGY

The process of forming a through cut in various solid materials under the influence of laser radiation propagating to the workpiece along a laminar water jet is considered. The resulting samples were examined for the main parameters of cut quality (surface roughness, burr size, deviation of the cut edge from perpendicularity, size of the heat-affected zone).

Прецизионная обработка материалов является основой для получения изделий высокого качества. Технология лазерной гидрорезки известна давно, но до настоящего времени пока не получила широкого распространения в Российской промышленности. Рассматриваемая технология позволяет обрабатывать: полупроводники, металлы, керамики, алмазы и композитные материалы. Особенность метода заключается в целом ряде преимуществ: высокое качество поверхности реза без грата, параллельные стенки реза, минимальные размеры зоны термического влияния, отсутствие компенсации положения фокуса, а также в возможности резки под углом [1].

Лазерный луч распространяется до обрабатываемой детали в струе воды на основе полного внутреннего отражения подобно распространению по волокну (рис. 1). Как только струя воды в стабильном диапазоне сталкивается с заготовкой излучение поглощается материалом. Получающееся в результате тепло плавит и испаряет зону абляции.

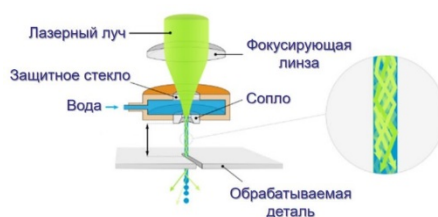


Рис. 1. Схема процесса лазерной гидрорезки

В работе используется волоконный квазинепрерывный лазер с максимальной средней мощностью 450 Вт. Лазерный луч удалось завести в ламинарную струю воды, формируемую сапфировыми соплами с диаметрами отверстий 140 и 80 мкм. Были проведены измерения средней мощности лазерного излучения в различных участках струи по ее длине. При прохождении лазерного луча в струе воды, часть мощности поглощается водой и поглощение определяется по закону Бугера-Ламберта:  $I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot z}$ , где  $I$  – интенсивность пучка на длине струи  $z$ ,  $I_0$  – интенсивность до входа в струю,  $k_\lambda$  – коэффициент поглощения излучения в воде.

При обработке материал удаляется послойно за несколько проходов. Ширина реза в основном зависит от диаметра струи. Технологией лазерной гидрорезки были успешно обработаны алюминий (рис. 2), жаропрочная сталь, титан, кремний, бериллиевая керамика, карбид вольфрама и синтетический алмаз.

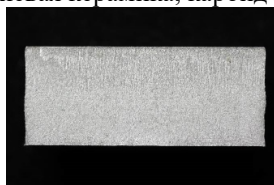


Рис. 2. Боковая кромка реза алюминия толщиной 8 мм (шероховатость поверхности: Ra 4,02 мкм, Rz 23,38 мкм)

Полученные результаты по резке различных материалов свидетельствуют о большом потенциале данной технологии в сравнении с электроэрозионной обработкой, гидроабразивной и лазерной резкой.

### Список литературы

1. Yan Liu, Meirong Wei, Tao Zhang, Hongchao Qiao, Hui Li, "Overview on the development and critical issues of water jet guided laser machining technology" Optics and Laser Technology № 137, 2021

М.С. ДУДАЛИН, В.В. КРАВЧЕНКО, К.И. ВОЛКОВ, Г.А. КАЗАРЦЕВ, А.П. КУЗНЕЦОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОМПЛЕКСА ЭЛЬФ НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА EPICS**

Проанализированы и рассмотрены различные программные пакеты, подходящие для создания системы управления. Для задач, реализуемых на установке ЭЛЬФ, была выбрана и отлажена экосистема Experimental Physics and Industrial Control System, как наиболее подходящая, для создания интуитивно понятной для стороннего пользователя системы управления.

M.S. DUDALIN, V.V. KRAVCHENKO, K.I. VOLKOV, G.A. KAZARTSEV, A.P. KUZNETSOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND CONTROL SYSTEM FOR THE ELF FACILITY BASED ON THE EPICS SOFTWARE PACKAGE.**

Various software packages suitable for creating a control system were analyzed and considered. For the tasks implemented at the ELF facility, the Experimental Physics and Industrial Control System was chosen and adjusted as the most suitable for creating a control system that is intuitive for third-party users.

Информационно управляющая система (ИУС) предназначена для управления лазерным комплексом в автоматизированном режиме, оперативного сбора информации о её работоспособности, сбора, хранения и предварительной обработки результатов экспериментов.

Информационно управляющая система построена на основе объектно-ориентированного иерархического подхода.

Основные требования к информационно управляющей системе, включают непрерывное (круглосуточное) функционирование; обеспечение самодиагностики и диагностики основного технологического оборудования; безопасность персонала и сохранности оборудования; предоставление технологической информации о проведенных экспериментах; ведение журналов событий.

ИУС должна функционировать в режимах: подготовки эксперимента; проведения эксперимента; обработки результатов эксперимента. В связи с тем, что Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) позволяет создать систему управления с соответствующими характеристиками, а также тем, что в экосистеме этого программного пакета содержится большое количество готовых решений и удобных для использования утилит, для реализации ИУС лазерного комплекса ЭЛЬФ выбрано именно это ПО [1]. Одним из многих преимуществ EPICS является то, что все устройства, находящиеся в одной локальной сети, автоматически получают доступ к информации, находящейся на других устройствах, и могут ее изменять. Также архитектура программного пакета EPICS позволяет минимизировать задержки в общении между устройствами, представляя собой real-time систему [2]. На данный момент реализована система наблюдения климатических параметров чистого помещения и графический интерфейс взаимодействия с вакуумной системой мишенной камеры, реализованы основные функции и паттерны работы вакуумной системы и система контроля климатических параметров. В ходе работы рассмотрены как различные типовые решения с готовыми сценариями, так и более сложные задачи, решенные благодаря гибкости используемого пакета EPICS. В дальнейшем будет реализовано управление системы синхронизации запуска эксперимента, контроля и запуска цикла зарядки и разрядки накопителей, лазерной части комплекса ЭЛЬФ, а также управление и контроль вспомогательных систем, графическая интерпретация, хранение и обработка данных, получаемых в ходе эксперимента.

### *Список литературы*

1. Kozubal A. J. et al. Run-time environment and application tools for the ground test accelerator control system //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1990. – Т. 293. – №. 1-2. – С. 288-291.
2. Knott M. et al. EPICS: A control system software co-development success story. – Argonne National Lab., IL (United States), 1993. – №. ANL/ASD/CP-79458; CONF-931023-2.

О.И. ГОРЧАКОВ, Л.А. ДУШИНА, Д.С. КОРНИЕНКО, А.Г. КРАВЧЕНКО, В.В. МИСЬКО,  
К.В. СТАРОДУБЦЕВ, В.М. ТАРАКАНОВ  
*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия*

## **МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОРМЫ И ПРОФИЛЯ ФРОНТА ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ВЫХОДЕ СИЛОВОГО УСИЛИТЕЛЯ УСТАНОВКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Описаны разработанные методики диагностики временной формы лазерного импульса на установке нового поколения. Проведено тестирование методики интегральной формы импульса на лазерном излучении системы задающего генератора установки. Представлены типовые результаты измерений.

O.I. GORCHAKOV, L.A. DUSHINA, D.S. KORNIENKO, A.G. KRAVCHENKO, V.V. MIS'KO,  
K.V. STARODUBTSEV, V.M. TARAKANOV  
*FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Russia*

## **INTEGRATED SHAPE AND FRONT PROFILE DIAGNOSTIC METHODS OF LASER PULSE AT POWER AMPLIFIER OUTPUT OF NEW GENERATION FACILITY**

Laser pulse time form diagnostics developed methods of new generation facility are described. The integrated waveform method is tested using laser radiation from the facility master oscillator system. Typical measurement results are presented.

Повышенные требования, выдвигаемые к методам диагностики лазерного излучения на установках нового поколения, задаются современным уровнем постановки экспериментов по программам лазерного термоядерного синтеза. Предполагается обязательное измерение временной формы лазерного импульса в каждом канале [1] с применением регистраторов, обладающих большим временным и пространственным разрешениями. Использование для облучения мишеней профилированных лазерных импульсов обусловило особую остроту проблемы реализации высокого динамического диапазона регистрации фронта греющего импульса на уровне  $\geq 10^5$  [2]. Все заявленные параметры одновременно можно реализовать в фотохронографических регистраторах [3].

На установке нового поколения разработали и внедрили методики диагностики интегральной формы и профиля фронта лазерного излучения на выходе силового усилителя. Часть силового излучения каждого канала отводится в систему диагностики, где распределяется между всеми регистраторами параметров лазерного излучения. Излучение, отобранное для определения параметров формы импульса и профиля фронта, ослабляется [4], замешивается по апертуре и транспортируется до щели фотохронографа по волоконно-оптическим линиям связи. На одном фотохронографе возможна регистрация от 8 до 16 лазерных каналов (в зависимости от постановки эксперимента). Характерное значение временного разрешения регистрации составляет 100 – 300 пс, пространственного разрешения  $\leq 100$  мкм. Представлены типовые результаты измерений.

Проведено тестирование методики на лазерном излучении системы задающего генератора установки с использованием штатной схемы диагностики задающего генератора на диодах det08. Временное разрешение в зависимости от постановки эксперимента составляло 80 пс и 300 пс. Полученные двумя системами отклонение форм импульсов составило не более 2%.

### *Список литературы*

1. Воронцов Е.Н., Кирдяшкин М.Ю., Кравченко А.Г. и др. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 10. С. 994.
2. J.P. Lindl. Development of the indirect-drive approach to internal confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. Phys Plasmas 2. 3933 (1995).
3. Корниенко Д.С., Кравченко А.Г., Литвин Д.Н. и др., Фотохронографические регистраторы для лазерного термоядерного синтеза // Приборы и техника эксперимента. 2014. №2. С. 1-12.
4. Патент на изобретение №2587684, опубликовано 20.06.2016. Способ регистрации временного профиля фронта светового импульса и устройство его реализации, Литвин Д.Н., Кравченко А.Г., Сенник А.В. и др.

## ФОРМИРОВАНИЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЭЛОВ МЕТОДОМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

В работе исследуется разработка технологии наплавки коррозионностойкого защитного покрытия на ТВЭЛы из порошка на основе хрома. С помощью разработанной программы на языке Python и цифровой обработки снимков газопорошковой струи были определены режимы наплавки, а также подачи порошка. Получен образец наплавленного слоя хрома толщиной 100 мкм с высоким показателем адгезии.

E.S. ERMILOVA, I.R. OVSYANKIN, A.A. GAVRIKOV, V.N. PETROVSKIY  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FORMATION OF CORROSION-RESISTANT PROTECTIV COATINGS ON THE SURFACE OF TVEL USING EHLA – EXTREME HIGH-SPEED LASER MATERIAL DEPOSITION

This article explores the development of a technology for surfacing a corrosion-resistant protective coating on heat-releasing elements from chromium-based powder. Using a developed program in Python and digital processing of images of a gas-powder jet, the modes of cladding and powder were determined. A sample of a deposited layer 100  $\mu\text{m}$  thick with a high adhesion index was obtained.

Во время аварии на АЭС "Фукусима-Дайити" циркониевая оболочка ТВЭЛов подверглась высокотемпературным химическим реакциям с паром в условиях, когда охлаждающая способность системы была нарушена природным катаклизмом. Вследствие этого фокус исследований в области ядерного топлива в настоящее время сосредоточен на разработке защитных оболочечных материалов с высокими эксплуатационными свойствами.

Наиболее востребованными в настоящее время способом для создания поверхностного слоя на ТВЭЛах является метод лазерной наплавки — прямого лазерного выращивания (DED). В нём порошок поступает коаксиально с лазерным излучением на обрабатываемую деталь. Однако из-за малых размеров трубок (толщина стенок – 0,7 мм) при длительном лазерном воздействии в процессе наплавки возникает перегрев материала. Решением данной проблемы является высокоскоростная наплавка (EHLA), которая предусматривает расплавление частиц порошка выше обрабатываемой детали, что обеспечивает большее поглощение излучения порошком, а не подложкой, позволяя значительно снизить тепловую нагрузку на деталь.

Газопорошковый поток является ключевым компонентом процесса наплавки. Данная работа способствует решению проблемы анализа геометрии порошковой струи и её распределения до подложки. Была подготовлена программа на языке Python, позволяющая определять диаметр порошковой струи в фокусе и расстояние до него на основе обработки кривой яркости снимков струи (рис. 1а). С помощью этой программы мы можем отследить влияние формы сопла и параметров газа на поток, а также подстроить каустику лазерного излучения для более эффективного расплавления порошка. Так, на практике, диаметр порошка в фокусе составил 2,5 мм, и, как следствие, была произведена дефокусировка лазерного излучения до получения плотность мощности  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при диаметре излучения 2,8 мм.

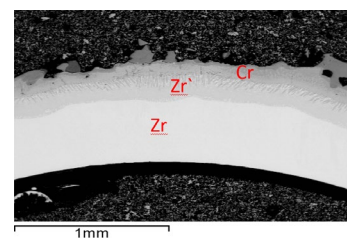
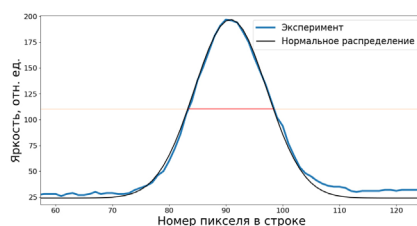
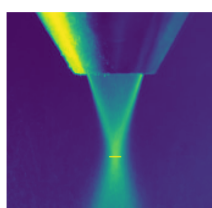


Рис. 1 а). Поиск фокуса потока порошка по кривой яркости усреднённых снимков газопорошковой струи.

Рис. 1 б). Микроструктурный анализ наплавленного покрытия

Путём проведения ряда экспериментов установлен режим наплавки, при котором результатом является слой толщиной 100 мкм, при этом присутствует зона термического влияния от 50 до 100 мкм (рис. 1б). Высокоскоростная наплавка выполнялась при следующих параметрах: линейная скорость обработки – 5 мм/сек, скорость вращения детали – 1000 об/мин, скорость подачи порошка – 180 г/мин, расход транспортного газа – 5 норм.л/мин, плотность мощности составила  $10^4$  Вт/см<sup>2</sup> при мощности излучения 3,5 кВт.

Д.Н. ИГНАТЕНКО, А.В. ШКИРИН, М.Е. АСТАСHEВ, С.Н. ЧИРИКОВ, С.В. ГУДКОВ  
*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991 Москва, ул. Вавилова 38  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31*

## **ЛАЗЕРНЫЙ СКАТТЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК СОДЕРЖАНИЯ ЖИРА И СОМАТИЧЕСКИХ КЛЕТОК В МОЛОКЕ ДЛЯ ДОИЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Разработан лазерный скаттерометрический датчик, способный измерять жирность молока и фиксировать превышение содержания соматических клеток (ССК) на допустимом уровне для интеграции в молочные системы. Датчик имеет проточный узел в виде трубки с боковым цилиндрическим отводом, в котором скапливается молоко с целью нивелирования интенсивного пузыреобразования и достижения непрерывности при работе доильного аппарата в режиме «молочной пробки». Работа датчика основана на регистрации углового распределения интенсивности света, рассеянного на прозрачном цилиндрическом участке отвода трубки. В качестве источника света используется полупроводниковый лазер с длиной волны 650 нм. Угловое распределение интенсивности рассеянного света (индикатриса рассеяния) регистрируется аксиальным фотодиодным массивом. Содержание жира определяется по среднему наклону измеренной индикатрисы рассеяния в диапазоне углов рассеяния  $72^{\circ}$ – $162^{\circ}$ . Уровень ССК оценивается по относительному отклонению интенсивности прямого рассеяния, нормированной на интенсивность обратного рассеяния, по отношению к беспримесному молоку. Датчик протестирован на доильном аппарате типа «Ёлочка».

D.N. IGNATENKO, A.V. SHKIRIN, M. E. ASTASHEV, S.N. CHIRIKOV, S.V. GUDKOV  
*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **A LASER SCATTEROMETRIC MILK FAT PERCENTAGE AND SOMATIC CELL COUNT SENSOR FOR USE IN MILKING SYSTEMS**

A laser scatterometric sensor, which is capable of measuring the fat content of milk and indicating the excess by which the somatic cell count (SCC) is over the permissible level, has been developed for installation in dairy systems. The sensor has a flow-through unit designed in the form of a pipe with a lateral cylindrical branch, in which milk accumulates so as to eliminate large bubbles and achieve continuity of the milk flow when the milking machine is working in the “milk plug” mode. The operation of the sensor is based on the registration of the angular intensity distribution of light scattered in the transparent cylindrical segment of the tube branch. A semiconductor laser with a wavelength of 650 nm is used as a light source. The angular distribution of the scattered light intensity (scattering indicatrix) is recorded using an axial photodiode array. The fat content is determined by the average slope of the measured scattering indicatrix in the range of scattering angles  $72^{\circ}$ – $162^{\circ}$ . The SCC level is estimated from the relative deviation of the forward scatter intensity normalized to the backscatter intensity with respect to uninfected milk. The sensor has been tested on a YOLOCHKA-type milking machine.

Предложен прототип лазерного датчика состава молока, основанный на измерениях углового распределения интенсивности рассеяния света в цилиндрической геометрии. Датчик имеет моноблочную компоновку, включающую в себя оптический блок, микроконтроллер и проточный блок. Аксиальный фотодиодный массив детектирует свет, рассеянный молоком, которое облучается лазерным диодом, работающим в режиме прямоугольных импульсов с длительностью импульса 5 с. Показания фототока снимаются с частотой  $1\text{ с}^{-1}$  и подвергаются медианной фильтрации. В качестве значения интенсивности рассеяния регистрируется разность между медианой фототока при включении лазера и медианой темного тока для каждого из 8 фотодиодов, расположенных под углами рассеяния ( $0^{\circ}$ ,  $18^{\circ}$ ,  $54^{\circ}$ ,  $72^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $126^{\circ}$ ,  $144^{\circ}$ ,  $162^{\circ}$ ), со скоростью обновления, соответствующей частоте прямоугольных лазерных импульсов. По логарифмическим значениям интенсивности рассеяния, измеренным на углах рассеяния ( $72^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $126^{\circ}$ ,  $144^{\circ}$ ,  $162^{\circ}$ ), определяется средний наклон индикатрисы рассеяния методом наименьших квадратов [1]. Затем путем подстановки полученного значения наклона в характеристическую функцию, связанную с жирностью молока, определяется процентное содержание жира. Кроме того, рассчитывается относительное отклонение разности логарифмированной интенсивности между углами прямого ( $0^{\circ}$ ) и обратного рассеяния ( $144^{\circ}$ ) от калиброванного значения разности для беспримесного молока. Величина этого отклонения сравнивается со средним значением, соответствующим допустимому ССК, равному  $10^5$  на мл, с целью фиксации превышения уровня ССК. Контроллер производит необходимые расчеты в циклическом режиме и периодически обновляет выходные значения процентного содержания жира и отклонения перепада интенсивности.

Лазерный скаттерометрический датчик может быть сопряжен с контроллером доильной системы и, соответственно, может использоваться в доильных залах и автоматизированных доильных системах.

### *Список литературы*

1. Nocedal J., Wright S. Numerical optimization.- New York: Springer-Verlag, 2006.

## ГЕНЕРАЦИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 5,5 ДО 9,5 МКМ ПУТЕМ ГЕНЕРАЦИИ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ $\text{AgGaS}_2$

Экспериментально продемонстрирована лазерная система среднего ИК-диапазона, излучающая импульсы длительностью  $\sim 100$  фс с длиной волны перестраиваемой от 5,5 до 9,5 мкм. Лазерная система построена на генерации импульсов излучения титан-сапфирового лазера в нелинейном кристалле  $\text{AgGaS}_2$ .

I.O. KINYAEVSKIY, A.V. KORIBUT, YA.V. GRUDTSYN, M.V. IONIN  
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## GENERATION OF FEMTOSECOND PULSES WITHIN WAVELENGTH RANGE FROM 5.5 TO 9.5 $\mu\text{m}$ BASED ON NONLINEAR CONVERSION OF A TITANIUM-SAPPHIRE LASER IN $\text{AgGaS}_2$ CRYSTAL

Mid-IR laser system emitting 100-fs pulses with wavelength tunable from 5.5 to 9.5  $\mu\text{m}$  is experimentally demonstrated. The laser system is based on difference frequencies of titanium-sapphire laser pulses in a nonlinear  $\text{AgGaS}_2$  crystal.

Разработка лазерных источников среднего ИК-диапазона с фемтосекундной длительностью импульсов представляет интерес в области фемтосекундной двумерной ИК-спектроскопии и генерации ТГц излучения в органических кристаллах [1-2]. Одним из основных методов получения таких импульсов является генерация разностных частот (ГРЧ) лазерного излучения ближнего ИК-диапазона в нелинейных кристаллах [3]. В данной работе мы использовали один из самых популярных нелинейных кристаллов -  $\text{AgGaS}_2$  (AGS), накачка которого осуществлялась фемтосекундными импульсами титан-сапфирового лазера.

В экспериментах использовался титан-сапфировый лазер, излучающий импульсы длительностью 100 фс с энергией до 10 мДж, центральной длиной волны  $\lambda \approx 0,95$  мкм, частотой следования импульсов – 10 Гц. Образец AGS размером 7 x 8 x 2 мм, вырезанный под  $\theta=43^\circ$ ,  $\varphi=0^\circ$ , выращен в Институте геологии и минералогии СО РАН.

Излучение титан-сапфирового лазера разделялось на два луча с помощью частично пропускающего зеркала. Один был лучом накачки, а другой — сигнальным лучом. Импульс накачки имел высокую энергию — до 2 мДж, а сигнальный луч, прошедший через газовую трубу длиной 1,46 м, содержащую  $\text{CO}_2$ , под давлением 3 атм, имел существенно меньшую энергию — 0,3 мДж. Газовая труба использовалась для формирования широкополосного излучения ближнего-ИК диапазона (1,0-1,1 мкм) посредством фазовой самомодуляции импульса при филаментации в газе. Также сигнальный луч проходил через полуволновую пластину, чтобы его поляризация в AGS соответствовала обыкновенной волне. Энергия импульса накачки регулировалась дифракционным ослабителем. Лазерные лучи волны накачки и сигнальной волны объединялись во времени и пространстве с помощью длинноволнового пропускающего фильтра LP02-980RU-25 (Semrock, США). Далее комбинированный импульс направлялся в кристалл AGS, который располагался на вращающемся столике для изменения угла падения на кристалл. Импульс среднего ИК-диапазона регистрировался фотодетектором PEM-L-3 (VIGO Systems, Польша).

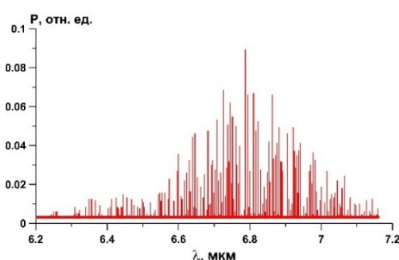


Рис. 1. Спектр при угле синхронизма  $38,3^\circ$

На выходе из кристалла зарегистрировано излучение ГРЧ при изменении угла падения от  $-5^\circ$  до  $15^\circ$  (углы синхронизма от  $34,3^\circ$  до  $43,6^\circ$ ), что соответствовало перестройке длины волны ГРЧ от 5,5 до 9,5 мкм. Такая перестройка длины волны наблюдалась в эксперименте при измерении спектров спектрометром на основе дифракционной решетки 75 штр/мм. Один из спектров, измеренный при угле синхронизма  $38,3^\circ$ , показан на рисунке 1. Рисунок 1 имеет линейчатую структуру, поскольку измерялся импульс за импульсом при медленном вращении дифракционной решетки. Спектр находился в диапазоне длин волн  $\sim 6.2$ -7.2 мкм. На уровне мощности 0,02 ширина спектра составила 0,5 мкм. Энергия импульса ГРЧ при энергии импульса накачки 1,7 мДж оценена как  $\sim 0,5$  мкДж, что соответствует эффективности 0.03%.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-79-10068.

### Список литературы

1. R. M. Hochstrasser, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2007. V. 104, pp. 14190–14196
2. Д. З. Сулейманова, Н. А. Жидовцев, Ф. В. Потемкин, Письма в ЖЭТФ, 2022, 115:2, p. 71–79
3. I.O. Kinyaevskiy, A.V. Koribut, L.V. Seleznev, et al. «Frequency conversion of a chirped Ti:sapphire laser pulse to 11.4  $\mu\text{m}$  wavelength with  $\text{SrMoO}_4$  Raman shifter and  $\text{LiGaS}_2$  DFG crystal», Optics & Laser Technology, 2024, V. 169, p. 110035



Н.М. КОЛЕСНИКОВ, К.Л. ГУБСКИЙ, К.С. ЛУКЬЯНОВ, М.Т. СЕМКИВ, И.Ю. ТИЩЕНКО  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ВОЛОКОННЫЙ ГЕТЕРОДИННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПЛАЗМЫ КОАКСИАЛЬНОГО АИПД**

Проведены измерения электронной плотности плазмы на коаксиальном абляционном импульсном плазменном двигателе (АИПД) интерферометрическими методами. Рассмотрена возможность уменьшения влияния шумов использованием двух различных длин волн зондирующего излучения. Проведена оценка точности величин, получаемых с использованием волоконного гетеродинного интерферометра.

N.M. KOLESNIKOV, K.L. GUBSKIY, K.S. LUKIANOV, M.T. SEMKIV, I.Y. TISHENKO  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **FIBER HETERODYNE INTERFEROMETER FOR RESEARCHING THE PROPERTIES OF PULSED PLASMA ON A COAXIAL $\mu$ PPT**

Researches of the electron density of plasma on a compact ablative pulsed plasma thruster ( $\mu$ PPT) of a coaxial design were carried out using interferometric methods. The possibility of reducing the effect of noise by using two different wavelengths of probing radiation is considered. The accuracy of the values obtained using a fiber heterodyne interferometer has been assessed.

В настоящее время ведутся разработки по созданию электрореактивных ракетных двигателей с большой тягой [1][2]. К ним относятся плазменные ракетные двигатели, вырабатывающим реактивную силу при помощи потока плазмы со скоростями до 100 км/с [1]. До установки плазменных ракетных двигателей на космические корабли, имеется необходимость измерения их основного параметра – тяги, для дальнейшей разработки устройств контроля двигателя. Для получения значений силовых характеристик (тяги) приходится использовать методы косвенных измерений [3], так как проведение измерений динамометрическими методами невозможно.

Внесение каких-либо измерительных приборов или зондов в долгоживущую высокотемпературную плазму не-возможно, поэтому для измерения используются дистанционные оптические методы. В настоящем исследовании для измерения электронной плотности плазмы использовались интерферометрические методы, в силу их надежно-сти, однозначности восстановления плотности плазмы из получаемого фазового сдвига, а также высокого простран-ственного разрешения [4].

Измерения электронной плотности плазмы проведены на коаксиальном абляционном импульсном плазменном двигателе (АИПД). В рамках работы была использована схема двухцветного гетеродинного интерферометра с квад-ратурной системой регистрации сигнала для измерения концентрации свободных электронов в испускаемом двига-телем потоке плазмы, а также скорости этого потока. Необходимость использования излучения на двух различных длинах волн (532нм и 1550нм) обусловлена необходимостью устранения влияния акустических помех и электромаг-нитных наводок на зондирующее излучение. Проведены исследования процессов, происходящих при распростране-нии излучения на различных длинах волн в одном оптическом волокне.

Эксперименты показали высокую помехозащищенность разработанного интерферометра. Точность фазовых измерений составила 0.03 rad, что соответствует погрешности измерения концентрации свободных электронов  $\pm 1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . Максимальная концентрация электронов составила  $7 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ .

### *Список литературы*

1. Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters. – Wiley, 2008.
2. Florenz R.E. THE X3 100-KW CLASS NESTED-CHANNEL HALL THRUSTER: MOTIVATION, IMPLEMENTATION AND IN-ITIAL PERFORMANCE. 3. Trottenberg A. S., Kersten H. Interferometric Force Probes for Thruster Plume Diagnostics and Indirect Thrust Measurements //35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, USA (2017). – 2017.
4. Кузнецов А.П. Лазерная интерферометрия в диагностике импульсной плазмы: Дис. док. ф.-м. наук: 01.04.21, 01.04.08 // Куз-нецов Андрей Петрович; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». - М., 2012, стр. 10

П.С. КУЛЕШОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup> ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, Россия

## АНТИОБЛЕДЕНИТЕЛЬНОЕ НАНОРЕЛЬЕФНОЕ ПОКРЫТИЕ И ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ

Сформулированы условия супергидрофобности нанорельефной поверхности при обтекании ее потоком воздуха с каплями воды. Исследована возможность нанесения нанорельефа на поверхности алюминия, титана и стали с помощью лазерной абляции для защиты от намерзания льда.

P.S. KULESHOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup> CIAM named after P.I. Baranov, Moscow, Russia

## ANTI-ICING NANO RELIEF COATING AND LASER ABLATION

The conditions of superhydrophobicity of the nanorelief of the surface when it is flowed by a stream of air with water droplets are formulated. The possibility of applying a nanorelief on the surface of aluminum, titanium and steel using laser ablation to protect against ice freezing has been investigated.

Проблеме обледенения летательных аппаратов (ЛА) и борьбе с этим явлением (не только в авиации) посвящено множество научных статей и обзоров, например, [1, 2]. В данной работе рассматривается пассивный метод борьбы с обледенением путем нанесения на защищаемую поверхность субмикронного бимодального рельефа для придания ей свойств супергидрофобности, согласно оформленной заявке на изобретение [3]. Сформулирован критерий выбора периода мелкой структуры нанорельефа для пассивной защиты от намерзания льда. Указана величина этого периода для типичных значений скорости ЛА и для среднего размера капель воды (Рис. Слева). Оценено влияние разброса размеров исходных капель и их фрагментов, образовавшихся при взаимодействии с обтекаемой поверхностью (Рис. Справа) на выбор периода нанорельефа. Введена поправка, уменьшающая период нанорельефа, в связи с уширением распределения фрагментов дробления на полувысоте пика (сплошная линия). Поправка может достигать 15%. Периоды мелкой структуры бимодального нанорельефа возникающие при лазерной абляции рассчитывались с помощью механизма резонансно-деформационного возбуждения капиллярных волн на поверхности расплава металла в зависимости от диаметра лазерного пятна, интенсивности и длительности лазерных импульсов [4, 5]. Показано, что такие периоды, полученные методом лазерной обработки поверхности алюминия, титана или нержавеющей стали, могут удовлетворять критерию супергидрофобности. Отличие расчетов от результатов экспериментов по сравнению с данными [5] удалось уменьшить в несколько раз за счет коррекции размера ванны расплава (жидкого резонатора). Этот размер, как оказалось, значительно превышает средний диаметр пятен лазерного излучения и линейно зависит от степени их перекрытия при сканировании по металлической подложке.

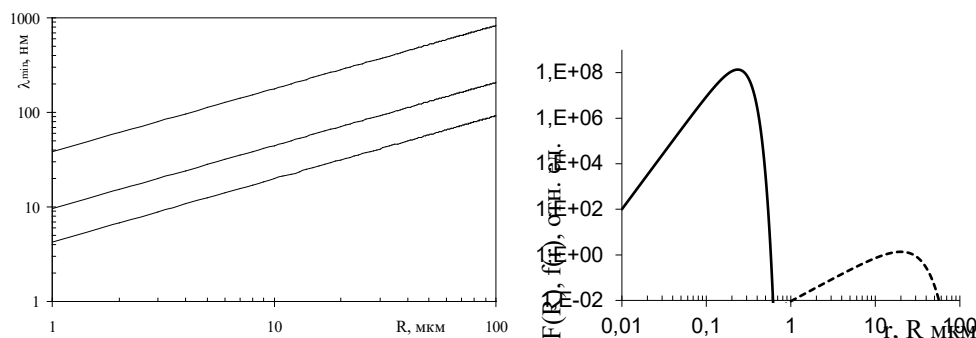


Рис. Слева: верхние границы допустимых значений периода рельефа в зависимости от радиуса капли  $R$  (линии расположены сверху-вниз по возрастанию скорости удара капли 50, 100, 150 м/с); Справа: распределения по размерам  $F(R)$  и  $f(r)$  капель в невозмущенном потоке при 100 м/с (пунктир) и их фрагментов после удара (сплошная).

### Список литературы

1. Амелюшкин И. А., Миллер А. Б., Стасенко А. Л. // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. 2021. № 1. С. 54–63.
2. Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В., Нагорная В.С., Мельников А.А. Особенности получения антиобледенительных покрытий (обзор) // ТРУДЫ ВИАМ №6 (66). 2018. С. 77-98. DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-77-98.
3. Кулешов П.С., Гелиев А.В., Кобцев В.Д. Способ придания супергидрофобных свойств поверхности металла // Заявка на изобретение: №2023113677, 26.05.2023.
4. Кулешов П.С., Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д. // Вестник МГОУ. Серия: Физика-Математика. 2022. №1. С. 41-51.
5. Кулешов П.С., Миколуцкий С.И., Хомич Ю.В. Механизмы формирования поверхностного нанорельефа при лазерной абляции // ТВТ. 2024. <https://www.mathnet.ru/rus/tvt11933>.

## ПОСТРОЕНИЕ СОГЛАСОВАННОГО ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ СЕРОВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МЕТОДА TDLAS

Проведено исследование применения метода согласованной фильтрации для решения задачи определения содержания сероводорода в атмосфере вблизи промышленных предприятий. Выполнен анализ возможностей метода для теоретических спектров поглощения  $H_2S$  и  $CO_2$ , проведена обработка экспериментально полученных сигналов поглощения  $H_2S$  при различных концентрациях с помощью согласованного фильтра с разными импульсными характеристиками. Полученные данные позволяют повысить уровень чувствительности детектирования слабоинтенсивных линий поглощения  $H_2S$  в составе атмосферы.

Z.S. MARKOV, S.V. KIREYEV, N.A. MARSHIN, A.A. KONDRASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CONSTRUCTION OF A MATCHED DIGITAL FILTER FOR SOLVING THE PROBLEM OF HIGHLY SENSITIVE DETECTION OF SMALL CONCENTRATIONS OF HYDROGEN SULFIDE BASED ON THE TDLAS METHOD

We report on a study of the use of the matched filtration method for the task of determining the hydrogen sulfide content in the atmosphere near industrial enterprises. An analysis of the method's capabilities for theoretical absorption spectra of  $H_2S$  and  $CO_2$  was carried out, and experimentally obtained  $H_2S$  absorption signals at various concentrations were processed using a matched filter with different impulse characteristics. The data obtained make it possible to increase the level of sensitivity in detecting low-intensity absorption lines of  $H_2S$  in the atmosphere.

Одной из задач при разработке точного и чувствительного газоанализатора на основе лазерных методов для определения содержания  $H_2S$  в атмосфере промышленных предприятий является задача поиска малого полезного сигнала на фоне побочных сигналов поглощения и шумов [1]. Одним из вариантов выделения полезного сигнала является согласованная фильтрация. Согласованный фильтр представляет собой оптимальную линейную систему, импульсная характеристика которой  $h(t)$  определяется таким образом, чтобы SNR на выходе фильтра был максимален. Импульсный отклик такого фильтра:  $h_{opt}(t) = FT^{-1}\{H_{opt}(f)\} = Ks(t_0 - t)$ , где  $K$  – действительная константа,  $s(t)$  – детерминированный сигнал.

Выходной сигнал согласованного фильтра  $y(t)$  представляет собой свертку входного сигнала с оптимальной импульсной характеристикой фильтра.

С помощью спектроскопической базы данных HITRAN выполнено моделирование спектра  $H_2S$  для давления 0.001 atm в диапазоне 4873 - 4878  $cm^{-1}$  в отсутствие и при влиянии поглощения излучения молекулами  $CO_2$ . В качестве импульсной характеристики выбран Лоренцев контур. Показано, что согласованный фильтр для сигнала поглощения  $H_2S$  легко позволяет обнаружить сигнал даже при низких значениях SNR.

Проведено измерение спектров  $H_2S$  на фоне побочных линий  $CO_2$  при различных давлениях смеси и последующая обработка с помощью метода согласованной фильтрации. Запись спектров осуществлялась с помощью измерительного комплекса, основанного на методе TDLAS. В качестве примера на рис. 1. изображен записанный спектр, содержащий линии  $CO_2$  и линию  $H_2S$ , и результат обработки сигнала методом согласованной фильтрации.

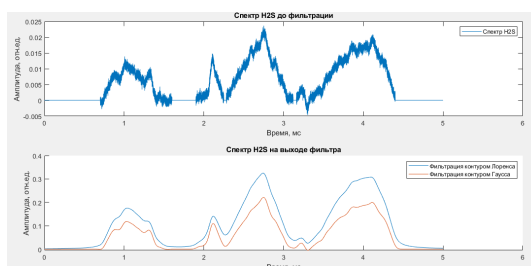


Рис. 1. Экспериментальный спектр  $H_2S$  на фоне линий  $CO_2$  и результат свертки с импульсной характеристикой фильтра

Полученные данные позволяют повысить уровень чувствительности детектирования слабоинтенсивных линий поглощения  $H_2S$  в составе атмосферы.

### Список литературы

1. S V Kireev, A A Kondrashov, M A Rybakov, S L Shnyrev, A.I. Sultangulova «Онлайн детектирование  $H_2S$  в газовых средах в области 4860–4880  $cm^{-1}$  методом диодной абсорбционной лазерной спектроскопии»

С.В. КИРЕЕВ, Н.А. МАРШИН, З.С. МАРКОВ, А.А. КОНДРАШОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СЕРОВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ДИОДНО-ЛАЗЕРНОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В ДИАПАЗОНЕ 4860 – 4880 $\text{cm}^{-1}$

Произведена оценка чувствительности метода детектирования сероводорода на основе метода диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии с использованием излучения полупроводникового диодного лазера (ПДЛ) частотного диапазона 4860 – 4880  $\text{cm}^{-1}$

S.V. KIRIEEV, N.A. MARSHIN, Z.S. MARKOV, A.A. KONDRASHOV.

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## EVALUATION OF THE SENSITIVITY OF HYDROGEN SULFIDE DETECTION BASED ON DIODE LASER ABSORPTION SPECTROSCOPY IN THE RANGE 4860 - 4880 $\text{cm}^{-1}$

The sensitivity of the hydrogen sulfide detection method based on the method of diode-laser absorption spectroscopy using radiation from a semiconductor diode laser in the frequency range 4860 – 4880  $\text{cm}^{-1}$  is estimated.

В современном мире анализ состава газа находит широкое применение во многих сферах деятельности человека. Сероводород является очень токсичным, бесцветным и легковоспламеняющимся газом. Разработка методов и средств определения содержания сероводорода является важной практической задачей.

В настоящей работе сообщается о проведении теоретических и экспериментальных исследований, необходимых для создания оптической измерительной системы, позволяющей проводить селективный анализ газовых смесей, содержащих  $\text{H}_2\text{S}$ . Исследования проводились с использованием полупроводникового лазера, частотно-перестраиваемого в диапазоне 4860 – 4880  $\text{cm}^{-1}$ .

Для оценки чувствительности измерительной системы в ходе экспериментальных работ проводилась регистрация величины сигнала с блока синхронного детектора в зависимости от давления анализируемой газовой смеси. Для этого производилось уменьшение концентрации сероводорода в оптической кювете путем откачки части газовой смеси. На рис. 1 приведена экспериментально полученная зависимость амплитуды сигнала, полученного с ФД, от величины концентрации сероводорода.

Полученное значение чувствительности может быть улучшено при помощи увеличения времени экспозиции накопления сигнала, т.е. при накоплении большого количества экспериментальных сигналов с ФД. Для того чтобы определить оптимальную величину времени экспозиции накопления сигнала и определить соответствующую величину чувствительности была использована статистическая модель вариации Аллана [1]. При помощи данной модели можно определить оптимальное число измерений, при котором их погрешность будет минимальной и, как следствие, величина чувствительности станет заметно лучше. Предельная чувствительность детектирования равна  $8,21 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

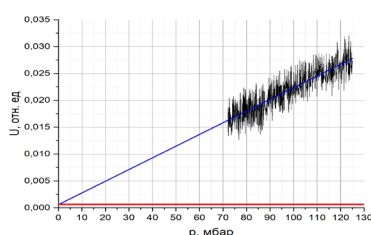


Рисунок 1. Зависимость амплитуды поглощенного сероводородом сигнала от давления

Таким образом, проведенные в настоящей работе исследования показывают возможность применения диодной лазерной спектроскопии для высокоточного анализа концентрации сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$  в атмосфере. Используемый подход может быть положен в основу разработки новых эффективных методов контроля концентрации сероводорода в среде. Рассчитана предельная чувствительность детектирования, равная  $8,21 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

### Список литературы

1. С.В. Киреев, А. А. Кондрашов, С. Л. Шнырев Разработка неинвазивной on-line диагностики онкологических заболеваний на основе абсорбционного метода в спектральном диапазоне 4860 – 4880  $\text{cm}^{-1}$ .

М. А. МИХАЛЕВИЧ, Е. А. ДАВЫДОВА, И. А. ФИЛАТОВ

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ НА СКОРОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЮРАЛЮМИНИЯ**

Рассмотрены механизмы образования слоя минеральных отложений на поверхности металла. Выдвинута и экспериментально проверена гипотеза о влиянии геометрических параметров рельефа и поверхностной энергии материала, изменяемых посредством структурирования наносекундными лазерными импульсами и последующей химической гидрофобизацией, на скорость образования налета.

М. А. MIKHALEVICH, E. A. DAVYDOVA, I. A. FILATOV

*ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia*

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF LASER STRUCTURING ON THE RATE OF FORMATION OF MINERAL DEPOSITS ON THE DURALUMIN SURFACE**

Mechanisms of formation of mineral deposits layer on metal surface are considered. The hypothesis about the influence of geometrical parameters of the relic and surface energy of the material, changed by means of structuring by nanosecond laser pulses and subsequent chemical hydrophobization, on the rate of scale formation is put forward and experimentally verified.

Проблема образования накипи на поверхностях теплообменных и трубопроводных устройств является массовой. Так, например, в России по данным 2019 года функционирует более 200.000 промышленных теплообменников [1], затраты на очистку которых составляют от 1-2 млрд. руб в год. Также из-за образования минерального нароста сужается рабочий диаметр любого трубопровода, что приводит к повышению давления и риску выхода установки из строя [2]. В настоящий момент данную проблему решают путем проведения механических и химических чисток [3], а также с помощью ингибирования рабочей жидкости [4]. Однако, данные методы требуют периодического демонтажа установки, не являются безопасными как для человека, так и с точки зрения экологии, и требуют

использования дополнительных ресурсов.

Цель данного исследования - проверка гипотезы о возможности управления скоростью образования накипи с помощью лазерной функционализации поверхности посредством изменения рельефа и поверхностной энергии материала. Для достижения поставленной задачи использовалось следующее оборудование: лазерный комплекс "МиниМаркер 2", работающий на волоконном итербиевом импульсном лазерном источнике с длиной волны 1064 нм, оптический микроскоп Zeiss, контактный профилометр, весы (HR-250az) для контроля массы образцов в ходе эксперимента и количественной оценки слоя минералогического отложения, датчик определения жесткости TDS & EC для контроля состояния среды проведения эксперимента. Контактный угол смачивания поверхности оценен с помощью метода лежащей капли. На поверхности алюминия с помощью лазерного структурирования был создан микрорельеф, повторяющий микроструктуру розы, с оптимизированными геометрическими характеристиками для получения максимальной степени гидрофобизации поверхности. После лазерной обработки образцы подвергались химической гидрофобизации: раствор состоит из диметилсульфоксида, дистиллированной воды и стеариновой кислоты [5]. Образцы выдерживали в данном растворе при температуре 30-40°C в течение 15-20 минут, после чего подложки высушивали на воздухе при нормальных условиях. Тесты на скорость образования минеральных отложений проводились в агрессивной среде с жесткой водой, жесткость воды была искусственно повышена на 150 мг-эквл/л путем растворения в дистиллированной воде хлорида кальция.

В ходе данной работы было исследовано влияние лазерного структурирования с заданными геометрическими характеристиками записанных структур на степень смачиваемости поверхности. Также исследована динамика изменения количества образовавшегося слоя минералогических отложений на образцах с различной обработкой в течение продолжительного времени нахождения подложек в агрессивном водном растворе. Работы выполнены в рамках Федеральной программы академического лидерства "Приоритет-2030".

### *Список литературы*

1. Елистратова Ю. В. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. – 2022.
2. Teng K. H. et al. Retardation of heat exchanger surfaces mineral fouling by water-based diethylenetriamine pentaacetate-treated CNT nanofluids //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 110. – С. 495-503.
3. Gridnevskii S. G. et al. Cleaning mineral deposits from large-diameter pipes //Metallurgist. – 1988. – Т. 32. – №. 7. – С. 251-253.
4. Arinaitwe E., Pawlik M. Dilute solution properties of carboxymethyl celluloses of various molecular weights and degrees of substitution //Carbohydrate polymers. – 2014. – Т. 99. – С. 423-431.
5. Бессонова К. А. и др. ГИДРОФОБИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЯ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТОЙ //Успехи в химии и химической технологии. – 2019. – Т. 33. – №. 3 (213). – С. 7-9.

## ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЮВЕЛИРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Исследовано влияние параметров лазерного воздействия на цветопередачу получаемых покрытий на поверхности серебра. Проведены тесты на химическую устойчивость получаемых цветных покрытий. На основании тестов на износостойкость было предложено промышленно доступное лакокрасочное покрытие, которое позволяет защитить получаемые цветные покрытия из наночастиц от воздействия внешних факторов.

A.A. MOROZOVA, U.A. KAPUSTINA, G.V. ROMANOVA  
National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia

## LASER SYNTHESIS OF PLASMONIC NANOPARTICLES IN AIR MEDIUM FOR APPLICATIONS IN THE JEWELRY INDUSTRY

The influence of laser exposure parameters on the color rendering of the obtained coatings on the silver surface was investigated. Tests on chemical stability of the obtained color coatings were carried out. On the basis of wear resistance tests, an industrially available paint coating is proposed to protect the obtained color coatings from the impact of nanoparticles of external factors.

Анализ актуального состояния ювелирной промышленности демонстрирует тренды, связанные с разработкой новых методов художественной обработки металлов. Выделяется подход, основанный на переходе от традиционных методов манипуляции над формой и цветом в пользу высокотехнологичных [1]. Уровень развития лазерных технологий позволяет утверждать о возможности использования лазера в качестве универсального инструмента для решения данных потребностей ювелирной промышленности.

В работе рассмотрены перспективы использования лазерных технологий для изменения оптических свойств поверхности. Ориентируясь на технологичность и экономичность процесса окрашивания, наиболее перспективными являются методы прямой лазерной записи. Ранее был продемонстрирован одноэтапный способ окрашивания поверхности серебра за счет получения наноструктур на поверхности с использованием лазерного воздействия с ультракороткой и короткой длительности импульса [2,3]. При воздействии высокоинтенсивного лазерного излучения температура поверхности обгоняет порог испарения, образуя металлический пар. Благодаря конвекции за короткое время температура быстро снижается, а конденсация пара приводит к образованию наночастиц. Эти частицы частично осаждаются обратно на поверхность. Это позволяет получать цвета без использования расходных материалов [4].

Однако, на данный момент технология не используется в промышленном аспекте. Это связано с неустойчивостью получаемых покрытий из наночастиц к воздействиям окружающей среды.

Для полноценного внедрения данного метода окрашивания в ювелирную промышленность проведено исследование влияния воздействия импульсного волоконного иттербиевого лазера с наносекундной длительностью импульса («Минимаркер-2», ООО «Лазерный центр»,  $\lambda=1064$  нм) на оптические свойства серебра. Использование данного лазерного источника обусловлено достаточным поглощением для нагревания выше температуры испарения выбранного материала на данной длине волны, а также его доступностью для приобретения участниками рынка в сравнении с фемто- и пикосекундными источниками. Для экспериментов были использованы пластины серебра 999,9 пробы, использование которых позволит изучить механизм формирования цвета при термическом воздействии лазерного излучения на серебро. Наблюдение и фиксирование изменений оптических свойств поверхности был выполнено методом оптической микроскопии (Carl Zeiss Axio Imager A1M в режиме отражения).

В результате было исследовано влияние параметров лазерного воздействия на цветопередачу получаемых покрытий на поверхности серебра, что позволило расширить и систематизировать получаемую палитру, а также адаптировать ее под специфику использования на производстве. Также проведены тесты на химическую устойчивость, которые легли в основу подбора защитного покрытия.

На основании тестов на износостойкость было предложено промышленно доступное лакокрасочное покрытие, которое позволяет защитить получаемые цветные покрытия из наночастиц от воздействия внешних факторов. Определяющими факторами при подборе покрытия были – простота и доступность, что определяет перспективность использования технологии лазерного окрашивания драгоценных металлов с предложенными методами защиты в ювелирной промышленности. Также было определено влияние нанесения дополнительного защитного покрытия на цветопередачу окрашенной поверхности.

### Список литературы

1. Широкова С. Ю. Современные материалы и технологии в декоративно-прикладном искусстве. – 2018.
2. Guay J. M. et al. Laser-induced plasmonic colours on metals //Nature communications. – 2017. – Т. 8. – №. 1. – С. 16095.
3. Odintsova G. V. et al. High-resolution large-scale plasmonic laser color printing for jewelry applications //Optics express. – 2019. – Т. 27. – №. 3. – С. 3672-3681.
4. Andreeva Y. M. et al. Laser coloration of metals in visual art and design //Optical Materials Express. – 2019. – Т. 9. – №. 3. – С. 1310-1319

М.А. МУРЗАКОВ<sup>1</sup>, Н.Н. ЕВТИХИЕВ<sup>1,2</sup>, Н.В. ГРЕЗЕВ<sup>1</sup>, Д.М. КАТАЕВ<sup>1</sup>, А.С. ЩЕКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Фрязино, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ МОДУЛЯЦИИ УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА НА ФОРМИРОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ЗОНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПРОЗРАЧНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

В работе было исследовано влияние модуляции ультракороткого импульса на процесс формирования модифицированной зоны прозрачного диэлектрика. Использование фемтосекундного волоконного лазера в режиме пачек импульсов (Burst Mode) позволило контролировать энергию, которая поступает в обрабатываемый материал и тем самым влиять на геометрию зоны модификации. В ходе исследования опробованы различные виды импульсов – линейные, синусоидальные, экспоненциальные и др. Было отмечено, что модуляция импульсов значительно влияет на форму модифицированной зоны. Были определены пороговые значения энергии, которые приводят к внутренним дефектам в виде трещин.

M.A. MURZAKOV<sup>1</sup>, N.N. EVTIKHIEV<sup>1,2</sup>, N.V. GREZEV<sup>1</sup>, A.S. SHCHEKIN<sup>2</sup>, D.M. KATAEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LLC “IRE-POLUS” LTD, Fryazino, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EFFECT OF BURST MODE MODULATION ULTRASHORT PULSE LASER ON THE LASER PROCESSING TRANSPARENT DIELECTRICS

The effect of ultrashort pulse modulation on the formation of a modified zone of a transparent dielectric was investigated. The use of a femtosecond fiber laser in Burst Mode made it possible to control the energy that enters the processed material and thereby influence the geometry of the modification zone. In the course of the study, various types of pulses were tested - linear, sinusoidal, exponential, etc. It was noted that pulse modulation significantly affects the shape of the modified zone. Energy thresholds have been determined that lead to internal defects in the form of cracks.

В лазерных технологиях широко применяется режим модуляции импульса для решения задач, связанных с началом и окончанием процесса лазерной обработки [1-2]. Также, этот режим используется для решения таких проблем, как улучшение неравномерности и нестабильности технологического процесса [3-5], снижение дефектов при лазерной обработке различных материалов [6]. Большинство современных лазеров УКИ (ультракоротких импульсов) имеют режим работы «Burst Mode», который позволяет доставлять большую энергию, чем при одиночном режиме импульсов. Анализ литературных источников показал, что модуляция ультракороткого импульса не была исследована и данные по модификации прозрачных диэлектриков, включая стекло, отсутствуют. В ходе данного исследования были рассмотрены различные формы импульсов, и изучены геометрические характеристики получаемых зон модификаций. Для подтверждения увеличения физико-механических свойств соединения «стекло-стекло» проведены механические испытания сварных швов, исследованы характеры мест разрушения зон модификаций. В таблице 1 представлены результаты ширины и длины зоны модификации в зависимости от типа модуляции.

Таблица 1. Средние значения длины и ширины зоны модификации от типа модуляции.

Тип модуляции	Длина, мкм	Ширина, мкм
Одиночные импульсы без модуляции	416	78
Генерация серии импульсов	579	210
Линейная модуляция	245	102
Синусоидальная модуляция	289	95
Экспоненциальная модуляция	187	71

Использование режима «Burst Mode» приводит к увеличению геометрических параметров зоны модификации – длины и ширины. При одиночных импульсах длина зоны модификации составляет 426 мкм, при режиме «Burst Mode» увеличивается до 579 мкм. Испытания сваренных образцов на срез, показали, что увеличение площади модификации приводит к увеличению прочности. В данном случае прочность сварных соединений в результате тестирования составили значения от 100 до 115 МПа. Режим «Burst Mode» с синусовой и линейной модуляцией лазеров УКИ позволяет контролировать геометрические размеры зоны модификации и тем самым увеличивать прочность сварных соединений.

### Список литературы

1. Lai W, Ganguly S and Suder W // Journal of Manufacturing Processes 58, 2020.
2. Ocelik V, Eekma V, Hemmati I and Hosson J // Surface and Coatings Technology 206, 2020.
3. Ning J, Na S, Zhang L, Wang X Long J and Cho W // Journal of Magnesium and Alloys 10, 2020.
4. Heider A, Stritt P, Weber R and Graf T // Physics Procedia 12, 2011
5. Zhang M, Wu J, Mao C, Cheng B and etc // Optics and Laser Technology 156, 2022
6. Zhang X, Bian S, Zhang W and Zhao P // Vacuum 218, 2023

Д.С. НУРАЕВ<sup>1,2</sup>, Р.А. ХАБИБУЛЛИН<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГОВОГО ТОКА И ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА С ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОКОЛО 3.4 ТГц

Рассмотрены два метода изучения характеристик квантово-каскадного лазера терагерцового диапазона с целью выявления доминирующего механизма, приводящего к затуханию генерации.

D.S. NURAEV<sup>1,2</sup>, R.A. KHABIBULLIN<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russia

## TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE THRESHOLD CURRENT AND OUTPUT POWER OF A QUANTUM CASCADE LASER WITH A GENERATION FREQUENCY OF ABOUT 3.4 THZ

Two methods of studying the characteristics of THz quantum cascade laser are considered in order to identify the dominant mechanism that leads to generation attenuation.

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ) представляют собой компактные твердотельные когерентные источники, позволяющие генерировать терагерцовое излучение, являющиеся «лидерами» среди источников в диапазоне 2–5 ТГц. На сегодняшний день одной из нерешенных проблем в ТГц ККЛ является ухудшение лазерных характеристик при увеличении температуры.

Проводились исследования зависимостей интегральной интенсивности излучения от тока накачки и вольт-амперных характеристик у ТГц ККЛ с двойным металллическим волноводом. В данной работе рассматривался импульсный режим работы лазера с длительностью импульса 500 нс.

Зависимость характеристик полупроводникового лазера от температуры часто характеризуется путем изучения изменения порогового тока в соответствии с феноменологической зависимостью  $J_{th} = J_1 + \exp(\frac{T}{T_0})$ , где  $T_0$  — характерная температура, является экспериментально определяемым параметром.

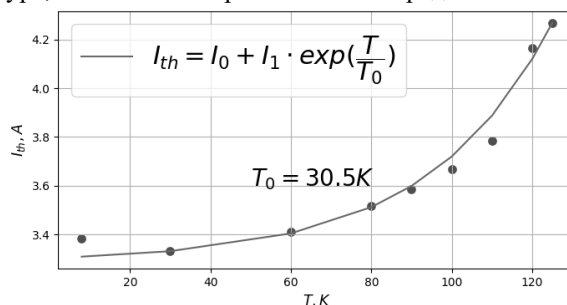


Рис. 1. Температурная зависимость порогового тока

По виду представленной зависимости, можно отметить, что после 60 К начинается сильный рост значений порогового тока, из чего можно предположить о начале фоновое рассеяния. К сожалению, нет простого способа связать  $T_0$  с физикой, лежащей в основе температурного гашения. Поэтому был предложен альтернативный метод описания характеристик полупроводниковых лазеров, основанный на изменении максимальной выходной мощности генерации в зависимости от температуры. Полученные результаты обсуждаются на возможность определить вклад различных механизмов рассеяния, приводящих к ослаблению генерации в исследованном ТГц ККЛ. Получается энергия активации и делается вывод о доминирующем механизме, а именно температурной активации испускания LO-фононов «горячими» электронами.

### Список литературы

1. Chun Wang Ivan Chan. Towards Room-Temperature Terahertz Quantum Cascade Lasers: Directions and Design: diss. PhD thesis. — Massachusetts Institute of Technology, 2015.
2. Fischer Milan. Terahertz Quantum Cascade Lasers based on InGaAs/InAlAs/InP semiconductors: diss. PhD thesis. — ETH Zurich, 2011.



Д. В. ПАНОВ

*Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОГРАФИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЕРЕПЛАВЛЕНИИ**

В работе представлен подход к моделированию поверхности при лазерном переплавлении. Рассматривается система уравнения Навье-Стокса в случае многофазной среды. Основной особенностью является учет переменной плотности расплава при нагреве. Для этого жидкая фаза имеет рассматривается в приближении малого числа Маха. В работе представлена верификация модели на простых задачах, а также валидация модели на примере лазерного переплавления одиночных треков.

D.V. PANOV

*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

## **MODELING OF SURFACE TOPOGRAPHY FORMATION DURING LASER SURFACE REMELTING**

The paper presents an approach to surface modeling in laser crossing. The system of the Navier-Stokes equation in the case of multiphase medium is considered. The main feature is to take into account the variable density of the melt. For this purpose the liquid phase is considered in the low-Mach approximation. The thesis presents the verification of the model on simple problems, as well as the validation of the model on the example of laser remelting of single tracks.

Лазерное поверхностное переплавление является перспективной технологией для финишной обработки изделий, в частности, полирования пресс форм. В этом процессе, управление топографией осуществляется за счет перераспределения материала под действием различных сил в ванне расплава. Таким образом, происходит минимальное удаление материала. Под лазерным поверхностным переплавлением в данной работе подразумеваются технологии лазерного полирования и структурирования переплавлением.

Несмотря на большое количество работ в данной области, предсказание результатов обработки остается до сих пор не решенной задачей. Поэтому перед применением данной технологии, требуется трудоемкий процесс оптимизации параметров. Помимо этого, некоторые наиболее оптимальные параметры, могут зависеть не только от начальной топографии поверхности, но и от химического состава материала. При этом, рассматриваемая технология имеет очень высокую чувствительность к изменению химического состава основного материала. Важно и формирования дефектов, которые имеют гидродинамическую природу [1].

Для объяснения эффектов, наблюдаемых в эксперименте и объяснения механизмов формирования топографии поверхности, в работе представлена гидродинамическая модель лазерного плавления. Основной особенностью является учет переменной плотности жидкой фазы металла. В работе рассмотрена система уравнений Навье-Стокса в случае малого числа Маха.

Приведена верификация модели в различных численных экспериментах. Рассмотрены случаи изменения объема при различных типах застывания в контейнере. Получены результаты при сравнении с работами по импульсной сварке. Также приведены результаты валидации модели при сравнении с экспериментальными данными по обработке одиночных треков. Полученные результаты показывают важность учета термокапиллярных сил, а также сжимаемость за счет изменения плотности в процессе нагрева и застывания. В рассмотренных случаях, предложенная модель показывает хорошую близость с полученными экспериментальными данными.

### *Список литературы*

1. Nüsser, C., Kumstel, J., Kiedrowski, T., Diatlov, A., & Willenborg, E. (2015). Process- and material-induced surface structures during laser polishing. *Advanced Engineering Materials*, 17(3), 268–277. <https://doi.org/10.1002/adem.201400426>

Е.В. ПАРКЕВИЧ, А.И. ХИРЬЯНОВА

*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук 119991, Москва, Россия*

## **СИЛЬНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ СОПРОВОЖДАЮТ ПРОХОЖДЕНИЕ КОГЕРЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ НЕОДНОРОДНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ МИКРОСТРУКТУРЫ**

Путем глубокого численно-теоретического моделирования изучены дифракционные эффекты, сопровождающие прохождение когерентного лазерного излучения сквозь неоднородные плазменные микроstructures. Установлены закономерности в поведении характеристик дифрагированного излучения, важные для прецизионной обработки лазерных изображений плазменных микрообъектов, фотографируемых оптическими линзовыми системами.

E.V. PARKEVICH, A.I. KHIRIANOVA

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences 119991, Moscow, Russia*

## **STRONG DIFFRACTION EFFECTS ACCOMPANY THE PASSAGE OF COHERENT LASER RADIATION THROUGH INHOMOGENEOUS PLASMA MICROSTRUCTURES**

Through in-depth numerical and theoretical modeling the diffraction effects accompanying the passage of coherent laser radiation through inhomogeneous plasma microstructures are studied. Regularities are established in the behavior of the characteristics of diffracted radiation, which are important for precise processing of laser images of plasma micron-sized objects photographed by optical lens systems.

Быстро развивающиеся плазменные микроstructures являются наиболее сложными объектами для оптических измерений. Это обусловлено короткими временными и пространственными масштабами эволюции плазмы, её ярким свечением в широком спектральном диапазоне, техническими трудностями постановки экспериментов с высокой точностью синхронизации диагностического и высоковольтного оборудования и т.д. Эффективный метод исследования свойств плазмы может быть реализован посредством её взаимодействия с когерентным лазерным излучением короткой длительности. Регистрируя изменения характеристик излучения (интенсивности, фазы, и др.) за исследуемым плазменным образованием, можно построить асимптотические решения обратных задач дифракции, восстановить распределение показателя преломления плазмы и проанализировать на его основе ключевые параметры плазмы. Однако сложные дифракционные эффекты могут сопровождать прохождение лазерного излучения сквозь неоднородную плазму и затруднять обработку её изображений, регистрируемых в эксперименте. Учесть дифракционные эффекты достаточно сложно, поэтому во многих экспериментальных исследованиях, связанных с техниками лазерного зондирования, такие эффекты попросту игнорируются, не интерпретируются и в целом ассоциируются с нежелательными оптическими артефактами. Хотя не учет дифракционных эффектов может привести не только к значительному искажению восстанавливаемых оптических характеристик плазменных микроstructures, но и в принципе к получению некорректных данных и представлений об объекте исследования. В работе мы детально проанализировали дифракционные эффекты, сопровождающие прохождение лазерного излучения сквозь неоднородные плазменные микроstructures, и смоделировали их дифракционные картины на выходе объекта и в ближней волновой зоне. Для этого было решено скалярное волновое уравнение Гельмгольца в первом приближении Рытова и рассчитано дифракционное расплывание прошедшего излучения в свободном пространстве. Рассматривалась дифракция плоской волны на неоднородной плазме для длин волн 532 нм и 1064 нм при характерных размерах плазменного объекта порядка 5-200 мкм. Обнаружено, что сильные дифракционные эффекты возникают при прохождении лазерного излучения через неоднородные плазменные микроstructures даже в самых простейших приближениях взаимодействия лазерного излучения с плазмой. Дифракционные эффекты усиливаются в ближней волновой зоне, существенно искажают картину плазменных образований, а также способствуют появлению различных оптических артефактов на изображениях плазмы. Путем численного моделирования детально охарактеризованы особенности визуализации плазменных образований в поле когерентного лазерного луча, регистрируемого оптической линзовой системой. Результаты исследований находятся в хорошем согласии с экспериментом и могут найти широкое применение при обработке лазерных изображений плазменных микроstructures, регистрируемых оптическими линзовыми системами при наличии сильных дифракционных эффектов.

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда № 19-79-30086.

### *Список литературы*

1. E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, K.T. Smaznova, D.V. Tolbukhin, V.M. Romanova, and S.A. Ambrozevich. Strong diffraction effects accompany the transmission of a laser beam through inhomogeneous plasma microstructures. *Physical Review E*. 2024 (In print).

2. E. Parkevich, A. Khirianova, T. Khirianov, D. Tolbukhin, Y. K. Bolotov, and S. Ambrozevich, On the quantitative evaluation of laser diffraction by plasma formations with a micron-sized diameter, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 50, 40 (2023).

В.И. ПИЧИЕНКО<sup>1</sup>, Д.А. ДЕШИН<sup>1</sup>, В.Д. ВОРОНОВ<sup>1</sup>, Э.Д. ИШКИНЯЕВ<sup>1</sup>, В.Н. ПЕТРОВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## СОЗДАНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ ОБЛАСТЕЙ В СПЛАВАХ СИСТЕМЫ Fe-Cr-Ni С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

В работе рассмотрен способ создания равномерного температурного распределения в метастабильных сплавах Fe-Cr-Ni с помощью осциллирующего лазерного луча с целью получения парамагнитных областей. Получены режимы обработки в температурном диапазоне от 600 до 900 °С (температура определялась с помощью тепловизора). Проведены механические испытания полученных образцов.

V.I. PICHENKO<sup>1</sup>, D.A. DESHIN<sup>1</sup>, V.D. VORONOV<sup>1</sup>, E.D. ISHKINYAEV<sup>1</sup>, V.N. PETROVSKIY<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CREATION OF PARAMAGNETIC REGIONS IN Fe-Cr-Ni ALLOYS USING AN OSCILLATING LASER BEAM

The paper considers a method for creating a uniform temperature distribution in metastable Fe-Cr-Ni alloys using an oscillating laser beam in order to obtain paramagnetic regions. To do this, an optimal scanning trajectory was selected, in which the downtime during the turn is minimal (this reduced overheating at the edges). Processing modes in the temperature range from 600 to 900 °C were obtained (the temperature was determined using a thermal imager).

В настоящее время создание парамагнитных областей в сплавах является важным направлением в материаловедении, так как полученная структура металла имеет лучшие механические свойства и износостойкость. Использование лазерных технологий для этой цели является одним из оптимальных вариантов в настоящее время, так как они позволяют обеспечить высокую скорость обработки и качество, локализованность.

Ключевым фактором для создания парамагнитных областей является создание равномерного температурного поля. Его создание при помощи лазерного излучения с гауссовым профилем интенсивности невозможно вследствие сильной теплопроводности образца (сильный перегрев в центре обработанной поверхности). Поэтому для предотвращения перегрева необходимо использовать источник энергии с максимально однородным распределением плотности мощности и иметь возможность варьировать параметры обработки в её процессе. Для этого использовалась установка, оснащённая лазером (мощностью до 10 кВт) и двухосевым сканатором, которым производилась обработка осциллирующим лучом с частотой колебаний порядка десятков Гц, скоростью движения, перпендикулярной траектории сканирования, около 1 мм/с и изменение мощности излучения в процессе.

Изменяя вышеперечисленные факторы, были получены режимы обработки с температурными полями 600-900 °С. Показатели температуры в каждый момент времени на обработанном участке снимались тепловизором. Над модифицированными образцами были произведены испытания на растяжение, а также была изучена микроструктура. Определена зависимость термомеханических свойств полученных микроструктур от температуры обработки.

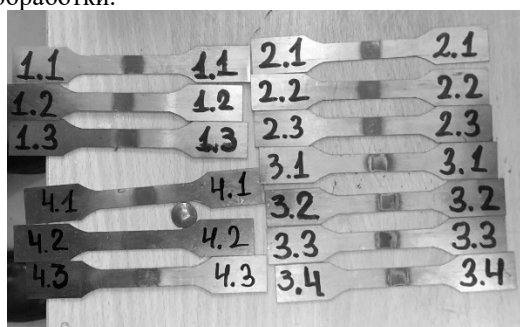


Рис.1. Образцы после обработки

### Список литературы

1. Е. Н. Блинова Влияние лазерной обработки на прочностные характеристики  $\gamma$ -фазы в сплавах системы железо-хром-никель / Е. Н. Блинова, М. А. Либман, В. Н. Петровский, Е. В. Пименов, П. П. Умнов, В. П. Филиппова, Т. Р. Чуева, Н. А. Шурыгина [Текст] // ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ФИЗИЧЕСКАЯ. — 2021. — Т. 85. № 7. — С. 984–989.
2. S. Martíneza, A. Lamikiza, E. Ukara, A. Callejaa, J.A. Arrizubietaa, L.N. Lopez de Lacallea Analysis of the regimes in the scanner-based laser hardening process [Текст] / S. Martíneza, A. Lamikiza, E. Ukara, A. Callejaa, J.A. Arrizubietaa, L.N. Lopez de Lacallea // Optics and Lasers in Engineering. — 2017. — № 90. — С. 72-80.

В.М. ПРОКОПЬЕВ, Р.Р. СУСЛОВ, И.А. ФИЛАТОВ, Р.И. БОГДАНОВ, С.А. ХУБЕЖОВ,  
Г.В. ОДИНЦОВА

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МОДИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СТАЛИ AISI 430 С ЦЕЛЬЮ УВЕЛИЧЕНИЯ СТОЙКОСТИ К ПИТТИНГОВОЙ КОРРОЗИИ ПОСРЕДСТВОМ ЛАЗЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ**

В данной работе представлено исследование влияния состава поверхностных и приповерхностных слоев на антикоррозионные свойства стали AISI 430. Определено оптимальное соотношение оксидных и металлических фаз стали, проведены электрохимические испытания на стойкость к питтинговой коррозии.

V.M. PROKOPIEV, R.R. SUSLOV, I.A. FILATOV, R.I. BOGDANOV, S.A. KHUBEZHOV,  
G.V. ODINTSOVA

*National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## **MODIFICATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF AISI 430 STEEL TO INCREASE RESISTANCE TO PITTING CORROSION BY LASER STRUCTURING**

This paper presents a study of the influence of the composition of surface and near-surface layers on the anti-corrosion properties of AISI 430 steel. The optimal ratio of oxide and metallic phases of steel was determined, electrochemical tests for resistance to pitting corrosion were carried out.

В настоящее время остро стоит проблема коррозии конструкционных материалов. Коррозии в агрессивных растворах подвергаются даже нержавеющие стали. Используемые методы защиты [1],[2] могут являться не всегда применимыми или оказывающими токсическое влияние на окружающую среду [3]. Поэтому существует необходимость исследования и разработки новых методов защиты.

Одним из таких перспективных методов является лазерная обработка. Однако, большинство исследований проводится с использованием дорогостоящего оборудования и расходных материалов.

Целью данного исследования является улучшение питтингостойкости стали AISI 430 с помощью промышленно доступной лазерной установки “МиниМаркер-2”. Обработка производилась разными режимами в различных температурных диапазонах. Проведенный XPS-анализ позволил определить химический состав как поверхностных оксидных слоев, так и приповерхностного металлического слоя, что позволило более точно определить влияние химического состава на антикоррозионные свойства стали.

Электрохимические коррозионные испытания проводились в водном растворе 3,5% NaCl в трехэлектродной ячейке с помощью потенциостата IPC-PRO-MF.. Исследование состава проводилось с помощью K-Alpha XPS, Thermo Scientific. Морфология поверхностей стали изучалась на сканирующем электронном микроскопе EDX Zeiss Merlin.

Улучшение стойкости к питтинговой коррозии было достигнуто при оптимальной концентрации оксида Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. При ней на поверхности образуется достаточная защитная оксидная пленка, но при этом в приповерхностных слоях сохраняется доля Cr в металлической фазе. Было определено, что наилучшие результаты показали образцы, обработанные режимами с плотностью мощности, не превышающей порог плавления.

Работы выполнены в рамках Федеральной программы академического лидерства "Приоритет-2030".

### *Список литературы*

1. Daubert J. S. et al. Corrosion protection of copper using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO, HfO<sub>2</sub>, and ZrO<sub>2</sub> atomic layer deposition //ACS applied materials & interfaces. – 2017. – Т. 9. – №. 4. – С. 4192-4201.
2. Alao A. O., Popoola A. P., Sanni O. The influence of nanoparticle inhibitors on the corrosion protection of some industrial metals: a review //Journal of Bio-and Tribo-Corrosion. – 2022. – Т. 8. – №. 3. – С. 68.
3. Kendig M. W., Buchheit R. G. Corrosion inhibition of aluminum and aluminum alloys by soluble chromates, chromate coatings, and chromate-free coatings //Corrosion. – 2003. – Т. 59. – №. 5. – С. 379-400.

А.А. УШАКОВ<sup>1</sup>, К.А. МАМАЕВА<sup>1</sup>, С.А. РОМАНОВ<sup>1,2</sup>, Т.В. ДОЛМАТОВ<sup>1</sup>, П.А. ЧИЖОВ<sup>1</sup>,  
В.М. ШЕВЛЮГА<sup>1</sup>, В.В. БУКИН<sup>1</sup>, С.В. ГАРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА

Приведены результаты по измерениям энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) в ТГц диапазоне при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами при различных значениях доли эмитируемых зарядов с поверхности катода и различных значениях напряжения, подаваемого между обкладками фотодиода.

A.A. USHAKOV<sup>1</sup>, K.A. MAMAIEVA<sup>1</sup>, S.A. ROMANOV<sup>1,2</sup>, T.V. DOLMATOV<sup>1</sup>, P.A. CHIZHOV<sup>1</sup>,  
V.M. SHEVLYUGA<sup>1</sup>, V.V. BUKIN<sup>1</sup>, S.V. GARNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

## GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION AT SUPERLUMINAL DISCHARGE OF A FLAT VACUUM PHOTODIODE

The results of measurements of electromagnetic radiation (EMR) energy in the THz range during superluminal discharge of a vacuum photodiode by femtosecond laser pulses at different values of the fraction of emitted charges from the cathode surface and different values of the voltage applied between the photodiode liners are presented.

ТГц излучение нашло огромное применение как в экспериментальных, так и в теоретических задачах. Ранее было показано, что при наклонном падении рентгеновского излучения на поверхность мишени образуется электронная эмиссия, формирующая ЭМИ [1]. В работах [2-3] предложена методика по усилению излучения при помощи внешнего поля, прикладывая которое энергия имитируемых с поверхности катода электронов резко возрастает, вследствие чего энергия ЭМИ увеличивается. Подобный метод продемонстрировал эффективную генерацию в СВЧ диапазоне. Уменьшение времени торможения электронов позволяет генерировать импульсы в более высокочастотной области, в том числе и ТГц. Таким образом, меняя конфигурацию фотодиода: расстояние между обкладками, величину внешнего поля, можно получить ЭМИ в ТГц диапазоне.

Целью работы является исследование способов генерации ТГц излучения при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами.

В роли источника ТГц излучения используется плоский вакуумный фотодиод, конструкция которого представляет собой анод, изготовленный из пластинки нержавеющей стали и, разделенный от него слоем диэлектрического изолятора, катод, представляющий собой сурьмяно-цезиевое покрытие ( $Cs_3Sb$ ), нанесенное на поверхность входного окна, изготовленного из сапфира. Для формирования электронной эмиссии под углом на фотокатод направляется фемтосекундное лазерное излучение (вторая гармоника титан-сапфирового лазера, центральная длина волны 400 нм, длительность импульсов до 50 фс, энергии импульсов до 1 мДж). Под действием лазерного излучения возникает электронная эмиссия, которая при воздействии внешнего электрического поля (50 – 100 кВ/см) ускоряется и тормозит в тонком слое нержавеющей анода. Регистрация излучения производится с помощью детектора Голея с использованием методики синхронного детектирования (рис.2).

В работе проводится исследование зависимости импульсов ТГц излучения от напряженности прикатодного поля и доли эмитируемого заряда с поверхности.

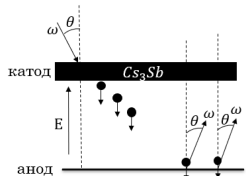


Рис. 1. Схема фотодиода

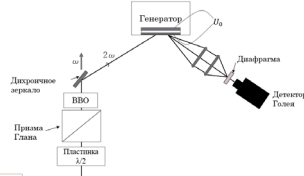


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Carron N.J., Longmire C.L. // Transactions on Nuclear Science. 1976 V.23 (6). P.1897-1902.
2. Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // Письма в ЖЭТФ. 1994 V.60 (9). P.625-628.
3. Brendel V. M., Bukin V. V., Garnov S. V. // Physics of Wave Phenomena. 2014 V.22 (4). P.219-222.

Г.С. РЫБАКОВ<sup>1,2</sup>, А.А.УШАКОВ<sup>1</sup>, Б.Д. ОВЧАРЕНКО<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ В Nd:YAG – ЛАЗЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЛИННОГО РЕЗОНАТОРА

Разработана лазерная система на основе активного элемента Nd:YAG с поперечной накачкой лазерными диодными решетками (ЛДР), генерирующая импульсы микросекундной длительности. С помощью электрооптического модулятора и оптического волокна, помещенных внутрь резонатора, достигалась микросекундная длительность импульса. Была зарегистрирована форма импульса излучения и измерена энергия лазерного импульса.

G.S. RYBAKOV<sup>1,2</sup>, A.A.USHAKOV<sup>1</sup>, B.D. OVCHARENKO<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>A.M. Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## GENERATION OF MICROSECOND LASER PULSES IN AN Nd:YAG LASER USING A LONG RESONATOR

A laser system based on the Nd:YAG active element with transverse pumping by laser diode arrays (LDR), generating microsecond pulses, has been developed. Using an electro-optical modulator and an optical fiber placed inside the resonator, a microsecond pulse duration was achieved. The shape of the radiation pulse was recorded and the energy of the laser pulse was measured.

Лазерные системы на основе Nd:YAG с модулированной добротностью и передачей излучения по световоду широко используются в целях интракорпоральной литотрипсии, но при типичных длительностях импульсов излучения для Nd:YAG-лазеров ( $\tau \sim 10$  нс) энергия лазерных импульсов, необходимая для разрушения камней, превышает порог лучевого пробоя материала оптического волокна. В связи с этим возникает потребность в увеличении длительности импульсов лазерного излучения.

Одним из методов увеличения длительности импульсов лазерного излучения является использование длинного резонатора. В данной работе для увеличения длины резонатора использовалось оптическое волокно длиной 25 м, диаметр сердцевины которого был 600 мкм. В качестве активного элемента использовался Nd:YAG стержень длиной 120 мм и диаметром 5мм. В качестве источника излучения накачки в квантронах, разрабатываемых в ИОФ РАН, применялись лазерные диодные решетки производства НПП "Инжект". Лазер работал в режиме модуляции добротности резонатора, которая осуществлялась с помощью ячейки Поккельса. Напряжение блока питания модулятора составляло 3,5 кВ. Получен лазерный импульс длительностью  $\sim 300$  нс по полувысоте и энергией в импульсе  $\sim 35$  мДж (рис.1).

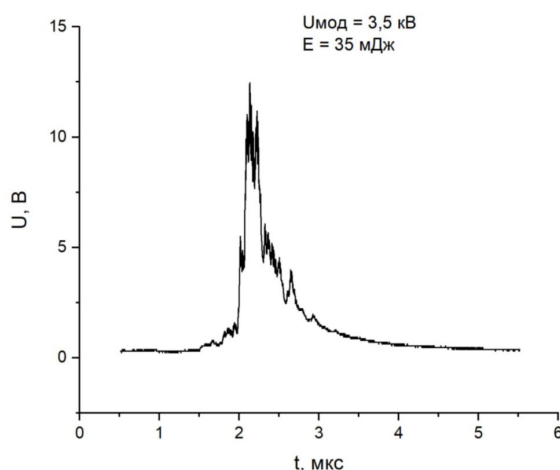


Рис. 1. Осциллограмма модулированного лазерного импульса с длительностью  $\sim 0,3$  мкс по полувысоте

## ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ ДВУХСЛОЙНОЙ ТОНКОПЛЁНОЧНОЙ СТРУКТУРЫ НА ГИБКОЙ ПОДЛОЖКЕ

Представлены результаты исследований двухслойной тонкопленочной структуры Al-Si на гибкой полиимидной подложке, обработанной с помощью лазера ближнего ИК диапазона. Установлено, что варьирование скорости сканирования лазерного луча позволяет реализовать либо термический механизм кристаллизации Si в данной структуре, либо диффузионный. Полученные результаты представляются значимыми для развития методики получения поликристаллических кремниевых слоёв для применения в гибкой электронике.

A.A. SERDOBINTSEV, L.D. VOLKOVYNOVA

Saratov State University, Russia

## FEATURES OF DIFFUSION AND CRYSTALLIZATION DURING LASER IRRADIATION OF A TWO-LAYER THIN-FILM STRUCTURE ON A FLEXIBLE SUBSTRATE

The results of studies of a two-layer Al-Si thin-film structure on a flexible polyimide substrate processed using a near-IR laser are presented. It has been established that varying the scanning speed of the laser beam makes it possible to implement either the thermal mechanism of crystallization of Si in a given structure or the diffusion mechanism. The results obtained seem significant for the development of techniques for producing polycrystalline silicon layers for use in flexible electronics.

Ранее была продемонстрирована возможность получения поликристаллических Si покрытий на гибких полиимидных (ПИ) подложках с использованием поглощающего слоя Al и ИК лазера [1]. В настоящей работе использовался двухслойный образец, представляющий собой слой Si толщиной 1 мкм, нанесённый на ПИ плёнку толщиной 500 мкм. Поверх слоя Si был нанесён слой Al толщиной 100 нм. Оба слоя наносились методом магнетронного распыления в одной напылительной установке без разрыва вакуума. Лазерная обработка проводилась с помощью установки «МиниМаркер-2», оснащённой волоконным лазером с длиной волны 1064 нм и оптическим гальваносканером. В качестве варьируемого параметра была выбрана скорость сканирования лазерного луча, как наиболее важный параметр производительности процесса. Исследования обработанных лазером образцов методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) позволили качественно объяснить механизмы кристаллизации Si при варьировании скорости сканирования лазера.

В ходе предыдущих исследований [2] было установлено, что появление кристаллической фазы Si, выявляемой с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния, возможно в двух случаях. Первичное появление кристаллической фазы Si при малых скоростях сканирования соответствует частичному удалению Al в результате абляции, сопровождающемуся диффузией остаточного металла в Si плёнку (рис. 1а). Si в данном случае кристаллизуется в результате теплопередачи от разогретого лазером Al. При повышении скорости сканирования флюенс лазерного излучения снижается, что приводит к сохранению Al слоя на поверхности Si плёнки ввиду недостаточности поглощённой энергии для абляции металла. Однако возникает интенсивная диффузия Si в разогретый слой Al, приводящая к формированию обогащённой Si приповерхностной области образца (рис. 1б). Кристаллизация в данном случае происходит за счёт выделения кристаллитов Si из Al-Si расплава.

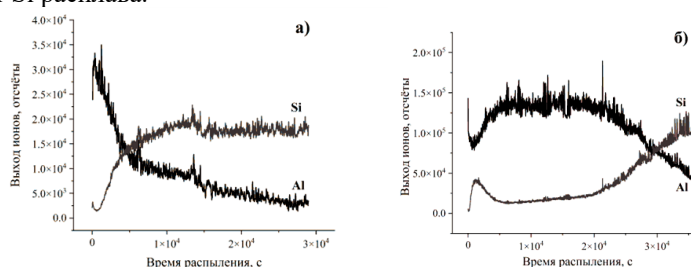


Рис. 1. ВИМС профили для малой (а) и большой (б) скорости сканирования

Полученные результаты могут лечь в основу разработки технологии получения поликристаллических слоёв Si на гибких полимерных подложках. Такие слои могут быть базовыми компонентами для высокоэффективных солнечных батарей и носимых датчиков параметров жизнедеятельности человека.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00047, <https://rscf.ru/project/23-22-00047/>

### Список литературы

1. Serdobintsev A.A., Luzanov V.A., Kozhevnikov I.O. and others // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1400, 055034.
2. Волковойнова Л.Д., Сердобинцев А.А. // ФТТ, 2023, Т. 65, вып. 12, с. 2177-2180.

Е.В. УЛТУРГАШЕВА, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, М.С. КОВАЛЕВ, С.И. КУДРЯШОВ  
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФИАН, Москва, Россия*  
*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

## СВЕТОУЛАВЛИВАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕНОЙ ОБРАБОТКИ

Рассмотрен лазерный метод формирования пирамидальных микроструктур на поверхности кремния. Определены оптимальные параметры формирования “пирамид”, исследован химический состав полученных структур, а также измерены коэффициенты отражения.

E.V. ULTURGASHEVA, A.A. NASTULYAVICHUS, M.S. KOVALEV, S.I. KUDRYASHOV  
*Federal State Budgetary Institution of Science LPI (Lebedev Physical Institute), Moscow, Russia*  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education BMSTU (Bauman Moscow State Technical University), Moscow, Russia*

## LIGHT-HARVESTING STRUCTURES ON SILICON OBTAINED BY LASER PROCESSING METHOD

Laser method of pyramidal microstructures formation on silicon surface is considered. The optimal parameters for the formation of “pyramids” were determined, the chemical composition of the resulting structures was studied and the reflection coefficients were measured.

Микроструктурированные поверхности находят большое применение в разных областях науки. Использование лазерного метода позволяет сократить время структурирования, чем если бы структуры были получены химическим травлением, при котором требуется дополнительная лазерная обработка для уменьшения коэффициента отражения в спектральном диапазоне 250-1100 нм. В данной работе рассматривается получение “пирамидальных” структур (рис. 1) на поверхности чистого и р-типа кремния лазерным излучением фемтосекундной длительности и длиной волны 1030 нм на воздухе. Запись структур производилась при следующих параметрах: мощность излучения 180 мВт, скорость сканирования 2 мм/с, частота лазера 5 кГц и перекрытие соседних линий 0.02. При этом лазерный луч фокусировался в пятно диаметром порядка 130 мкм.

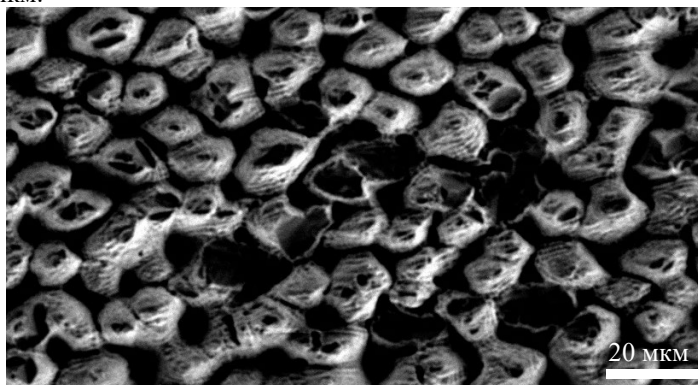


Рис. 1. СЭМ-изображение полученных микроструктур

Химический состав полученных структур исследовался методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Комбинационное рассеяние света показало, что после структурирования кристаллический кремний переходит в аморфное состояние.

Значение коэффициента отражения структурированной поверхности кремния в спектральном диапазоне 250-1100 нм коррелирует с нашими прошлыми результатами [1] и составляет менее 15 %.

**Благодарность:** результаты получены в рамках выполнения госзадания №FSFN-2024-0019.

### Список литературы

1. Kovalev M., Podlesnykh I., Nastulyavichus A., Stsepuro N. and others // *Materials*. 2023. Vol. 16, № 2350. P. 1-9.



Д.В. БАДИКОВ<sup>1</sup>, А.А. ИОНИН<sup>2</sup>, М.В. ИОНИН<sup>2</sup>, И.О. КИНЯЕВСКИЙ<sup>2</sup>,  
Ю.М. КЛИМАЧЕВ<sup>2</sup>, А.М. САГИТОВА<sup>2</sup>, Е.П. ФЕДОРОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кубанский государственный университет, Краснодар

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ СО-ЛАЗЕРА В КРИСТАЛЛЕ BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub>

Представлены результаты экспериментов по генерации суммарных частот излучения неселективного СО-лазера с модуляцией добротности резонатора в нелинейном кристалле BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub>. Реализован как I-тип, так и II-тип фазового синхронизма.

D.V. BADIKOV<sup>1</sup>, A.A. IONIN<sup>2</sup>, M.V. IONIN<sup>2</sup>, I.O. KINYAEVSKIY<sup>2</sup>,  
YU.M. KLIMACHEV<sup>2</sup>, A.M. SAGITOVA<sup>2</sup>, E.P. FEDOROVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kuban State University, Krasnodar

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

<sup>3</sup>National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

## SUM-FREQUENCY GENERATION OF Q-SWITCHED CO LASER IN BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub> CRYSTAL

The results of experiments on the sum-frequency generation of Q-switched CO laser radiation in BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub> nonlinear crystal are present. Both types I and II of this conversion were observed.

В настоящее время активно ведется поиск и исследование новых высокоэффективных нелинейных кристаллов для преобразования лазерного излучения среднего ИК-диапазона [1, 2]. Одним из таких кристаллов является BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub>. Первые исследования этого кристалла показали его перспективность: он имеет широкое окно пропускания в видимом и среднем ИК диапазоне [1], а также является более химически устойчивым нежели кристаллы BaGa<sub>2</sub>SiS<sub>6</sub> и BaGa<sub>2</sub>SiSe<sub>6</sub>. Однако на практике это пока не подтверждено, поэтому целью работы было тестирование кристалла BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub> в эксперименте по генерации суммарных частот (ГСЧ) излучения СО-лазера.

Использованный нами СО-лазер работал в неселективном режиме модуляции добротности резонатора (МДР). Излучение лазера фокусировалось линзой ( $f = 115$  мм) в нелинейный кристалл BaGa<sub>2</sub>GeS<sub>6</sub> длиной 2 мм, который был установлен на автоматизированный поворотный столик с точностью контроля угла поворота  $0.9^\circ$ . Средняя мощность СО-лазера, падающая на кристалл, составляла  $\langle P_{CO} \rangle = 108$  мВт при частоте МДР  $\sim 100$  Гц, что соответствует пиковой мощности  $P_{пик} = 3.2$  кВт. Измерения мощности ГСЧ были произведены при сканировании зенитного угла  $\theta$  для нескольких значений азимутального угла  $\varphi$ .

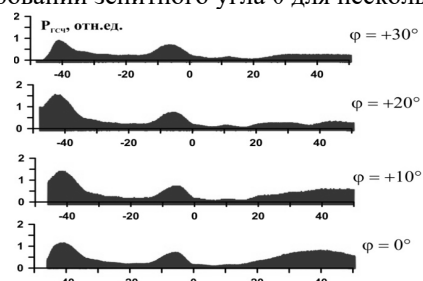


Рис. 1. Зависимость  $P_{ГСЧ}$  от зенитного угла  $\theta$  для различных значений азимутального угла  $\varphi$

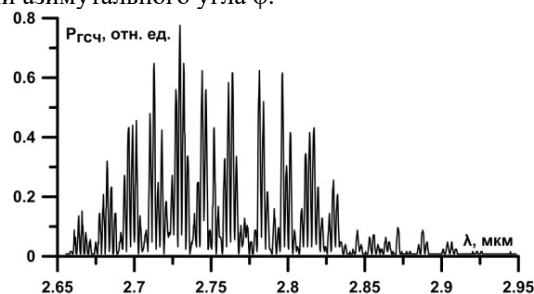


Рис. 2. Спектр генерации суммарных частот

При сканировании угла  $\theta$  наблюдалось два максимума сигнала излучения ГСЧ (рисунок 1). Центральный пик, наблюдаемый при  $\theta \approx -7^\circ$ , соответствующий с учетом преломления внутреннему углу  $\theta_{внут} \approx -3^\circ$  отвечает I типу преобразования. В этом случае с учетом угла среза кристалла  $\theta_{ср} \approx 33^\circ$  угол фазового синхронизма (ФС) в кристалле оказывается равным  $\theta_{ФС} \approx 36^\circ$ . Левый пик, наблюдаемый при  $\theta \approx -42^\circ$ , соответствующий с учетом преломления внутреннему углу  $\theta_{внут} \approx -17^\circ$ , отвечает II типу преобразования. В этом случае с учетом угла среза кристалла угол ФС в кристалле оказывается равным  $\theta_{ФС} \approx 50^\circ$ . Это хорошо согласуется с расчетными данными [2]. Характерный спектр ГСЧ показан на рисунке 2. Спектр насчитывал примерно 80 линий в диапазоне от 2.65 мкм до 2.95 мкм с максимумом мощности вблизи 2.73 мкм.

### Список литературы

1. Badikov V. V., Badikov D. V., Laptev, V. B., et al. // Optical Materials Express. 2016. Vol. 6, №9. P. 2933-2938.
2. Kato K., Umemura N., Badikov V. V., et al. // Applied Optics. 2022. Vol. 61, № 36. P. 10774-10777.

В.А. ХОХЛОВ, Н.А. ИНОГАМОВ

*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН, Черноголовка Московской обл., Россия*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЗКОГО ПУЧКА ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЛАЗЕРА**

С помощью численного моделирования (гидродинамического) изучено формирование цилиндрической полости

под действием узкого пучка жесткого рентгеновского лазера

V.A. KHOKLOV, N.A. INOGAMOV

*L.D. Landau Institute for Theoretical Physics RAS (L.D. Landau ITP RAS), Chernogolovka, Moscow region, Russia*

## **FORMATION OF A CYLINDRICAL CAVITY UNDER THE ACTION OF A NARROW BEAM HARD X-RAY LASER**

The formation of a cylindrical cavity under the action of a narrow beam of a hard X-ray laser has been studied by means of numerical modeling (hydrodynamic).

Рассмотрено действие фемтосекундного импульса рентгеновского лазера с энергией фотонов 10 кэВ на фторид лития (LiF). Глубина затухания такого излучения в LiF  $D_{att}$  составляет 475 мкм, что значительно больше, чем диаметр пучка  $d_0$  на поверхности мишени, который составляет около 1 мкм. Расходимость пучка мала. Поэтому при длине  $D_{att}$  диаметр пучка лишь незначительно увеличивается по сравнению с входным диаметром  $d_0$  [1]. В данной работе исследуется внутреннее течение в мишени, инициированное поглощением вдоль длины пучка вдали от поверхности и дна полости. Задача анализируется в приближении цилиндрической симметрии - искомые величины зависят только от радиуса  $r$  и времени  $t$ . Это приемлемо поскольку, во-первых, пучок узкий ( $d_0 \ll D_{att}$ ) и, во-вторых, рассматривается течение вдали от поверхности мишени. Поглощенная плотность энергии составляет примерно 100 эВ/атом или 0,941 МДж/см<sup>3</sup>, при этом давление и температура в нагреваемом веществе в конце лазерного импульса составляют 10 Мбар и 550 кК. Вместо LiF в расчетах используется уравнение состояния алюминия. Дело в том, что, с одной стороны, существует хорошо разработанное широкодиапазонное многофазное уравнение состояния алюминия (разработанное в ИИХТ РАН). С другой стороны другой стороны, механические характеристики этих материалов примерно одинаковы (холодная кривая, модуль упругости, плотность) [2].

### *Список литературы*

[1] Makarov S et al 2023 Opt. Express 31 26383-26397

[2] Хохлов В А и Иногамов Н А 2022 Вестник ОИВТ РАН 8 07

Р.С. ШТРАЙХ<sup>1,2</sup>, Р.А. ХАБИБУЛЛИН<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова РАН, Москва, Россия

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ В ККЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТОЛЩИНЫ ИНЖЕКЦИОННОГО БАРЬЕРА

Произведено моделирование зонного дизайна квантово-каскадного лазера (ККЛ), основанного на рассеянии на продольно-оптическом фононе. Рассмотрено изменение расстояния между инжекционным уровнем и верхним лазерным уровнем при изменении толщины инжекционного барьера.

R.S. SHTRAIKH<sup>1,2</sup>, R.A. KHABIBULLIN<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of RAS, Moscow, Russia

## THEORETICAL STUDY OF ENERGY LEVELS IN QCLS WHEN CHANGING THE THICKNESS OF THE INJECTION BARRIER

The band design of a quantum cascade laser (QCL) based on scattering by a longitudinal optical phonon was simulated. The change in the distance between the injection level and the upper laser level with a change in the thickness of the injection barrier is considered.

Моделирование профиля дна зоны проводимости ККЛ, основанного на рассеянии на продольно-оптическом фононе [1], производилось бесплатной программой с открытым исходным кодом ErwinJr2 [2]. В данном дизайне при внешнем электрическом поле равном 12,2 кВ/см расстояние между инжекционным уровнем и верхним лазерным уровнем (энергия расщепления) равняется 5,7 мэВ.

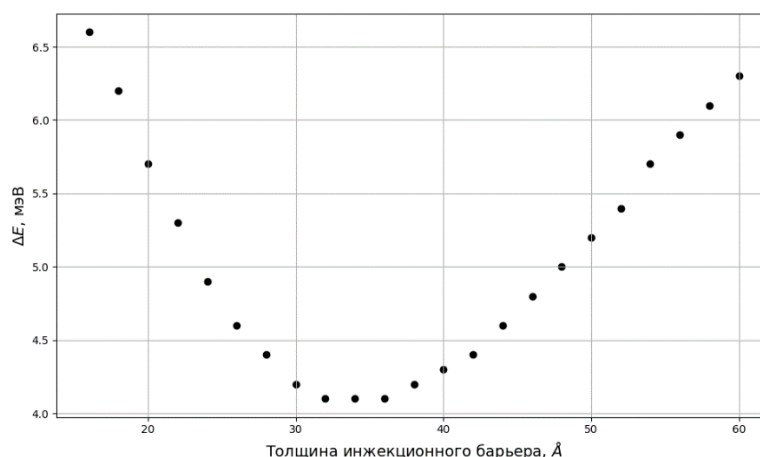


Рис. 1. Зависимость расстояния между инжекционным уровнем и верхним лазерным уровнем от толщины инжекционного барьера

По рис. 1 можно найти минимум энергии расщепления — 4,1 мэВ, он достигается при толщине барьера 3,2–3,6 нм. Энергия оптического перехода электрона при этом равняется 14,8 мэВ. Депопуляция нижнего лазерного уровня происходит через переход на нижний уровень, расстояние между ними — 42,5 мэВ, что немного больше энергии продольно-оптического фонона (36 мэВ).

### Список литературы

1. Benjamin S. [et al.]. 3.4-THz quantum cascade laser based on longitudinal-optical-phonon scattering for depopulation // APL. 2003. V. 82(7). P. 1015–1017.
2. ErwinJr2. A software for Quantum Cascade Laser design and simulation [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/ErwinJr2/ErwinJr2> (дата обращения: 10.03.2024).

П.А. ЩЕГЛОВ, А.А. ТАУСЕНЕВ, М.В. ЧАЩИН, А.В. ЛАЗАРЕВ, В.М. ГОРДИЕНКО, Т.А. СЕМЕНОВ, М.М. НАЗАРОВ

*Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт", Москва, Россия  
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, химический факультет, Россия, Москва  
Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, Москва*

## **ШИРОКОПОЛОСНОЕ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КЛАСТЕРНОЙ ПЛАЗМЫ Kr И Ar ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Исследована генерация рентгеновского излучения при воздействии релятивистских лазерных импульсов на кластеры криптона и аргона. В криптоне получен наибольший выход характеристических фотонов:  $3 \cdot 10^8$  фотонов/( $4\pi$ -импульс) – что соответствует рекордной эффективности преобразования лазерного излучения в рентгеновское  $4 \cdot 10^{-6}$ . Широкополосное излучение было получено из обоих газов, для криптона, тормозной спектр имел наибольшую температуру  $T_e = 6.1 \pm 0.1$  кэВ в диапазоне 7 – 17 кэВ.

P.A. SHEGLOV, A.A. TAUSENEV, M.V. CHASCHIN, A.V. LAZAREV, V.M. GORDIENKO, T.A. SEMENOV, M.M. NAZAROV

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
Department of Chemistry, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow Russia  
Department of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **BROADBAND AND CHARACTERISTIC RADIATION OF Kr AND Ar CLUSTER PLASMA IN INTERACTION WITH RELATIVISTIC LASER PULSE PULSES**

The generation of X-ray radiation under the influence of relativistic laser pulses on krypton and argon clusters has been studied. The highest yield of characteristic photons was obtained in krypton:  $3 \cdot 10^8$  photons/( $4\pi$ -pulse) – which corresponds to the record efficiency of converting laser radiation into X-ray radiation  $4 \cdot 10^{-6}$ . Broadband radiation was obtained from both gases; for krypton, the bremsstrahlung spectrum had the highest temperature  $T_e = 6.1 \pm 0.1$  keV in the range 7 – 17 keV.

Последние несколько десятилетий возрастает интерес к лазерно-плазменным источникам рентгеновского излучения для время-разрешенной дифрактометрии и спектроскопии поглощения. Кластеры – возобновляемый, чистый источник лазерной плазмы. В данной работе мы исследовали возможность создания 2х типов источников: спектрально-яркого и широкополосного рентгеновского излучения – при взаимодействии лазерного излучения релятивистской интенсивности со струей кластеров криптона и аргона.

Работы проводились на лазерном комплексе «Pulsar-200 TW», генерирующем лазерные импульсы с центральной длиной волны 800 нм, длительностью 30 фс, использовалась энергия до 150 мДж. Лазерные импульсы фокусировались внеосевой параболой на импульсную газо-кластерную мишень, создавая плазму. Кластеры формировались методом сверхзвукового расширения газа высокого давления (10-40 бар) в вакуум через коническое сопло (угол раствора  $10^\circ$ , критическое сечение 0.6 мм, выходной диаметр 2.5 мм). Рентгеновское излучение, генерируемое лазерной плазмой, распространялось в  $4\pi$  и регистрировалось ФЭУ с NaI сцинтиллятором формируя интегральный рентгеновский сигнал и рентгеновской кремниевой ПЗС-камерой Greateyes ALEX-s 1k256 FI DD, работающей в однофотонном режиме с разрешением по спектру.

В ходе измерений исследовался вывод рентгеновского излучения из лазерно-плазменного источника в зависимости от энергии и длительности лазерного импульса, положения лазерного фокуса относительно кластерной струи и размеров самих кластеров мишени. Достигнута рекордная эффективность преобразования  $4.2 \cdot 10^{-6}$  лазерного излучения в характеристические кванты  $K_\alpha$  (12.6 кэВ) при воздействии на крупные (диаметр  $d = 54$  нм) кластеры криптона релятивистских (интенсивность лазерного излучения  $I \approx 5 \cdot 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) фемтосекундных лазерных импульсов. Лазерно-плазменный импульсный источник характеристических фотонов обеспечивал пиковый поток  $3 \cdot 10^8$  фот/ $4\pi$ -имп, с яркостью  $10^{19}$  фот/(с·мрад<sup>2</sup>·мм<sup>2</sup>) в субпикосекундном импульсе, что соответствует уровню источников синхротронного излучения 3-го поколения. Тормозной спектр плазмы имел температуру  $T_e = 6.1 \pm 0.1$  кэВ в диапазоне 7 – 17 кэВ. При использовании аргона ( $d = 44$  нм) были получены  $K_\alpha$  фотоны на 3 кэВ и широкополосное рентгеновское излучение, тормозная часть спектра которого имела температуру  $T_e = 4.9 \pm 0.3$  кэВ. Для реализации как спектрально-яркого рентгеновского источника, так и широкополосного источника перспективно использовать кластеры криптона, а более экономично - аргон.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.

Н.А. КЛЕОПОВА, В.Н. АЛЕКСЕЕВА, Т.А. ДАЛЬБЕРГ, З.Б. ЗЫДРАБЫН, Н.А.  
КУЦЕКОБЫЛЬСКИЙ, М.М. ПОЛОЗОВА

*Российский технологический Университет МИРЭА, Москва, Россия*

## **СРАВНЕНИЕ КОНТАКТНОГО И ПРОЕКЦИОННОГО МЕТОДОВ СТЫКОВКИ ПЗС СЕНСОРОВ ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ВЫХОДНОГО ЭКРАНА СТРИК- КАМЕРЫ**

Был произведен поиск и подбор считывающих устройств, разрешающая способность которых с трехкратным запасом перекрывает требования по разрешающей способности электронно-оптического преобразователя, максимально возможной чувствительностью, динамическим диапазоном более  $10^4$  и со встроенной коррекцией искажений электронно-оптического тракта для решения различных задач, в том числе для установок лазерного термоядерного синтеза. Проведена качественная оценка характеристик этих считывающих устройств. Рассмотрены вопросы переноса изображений с экрана электронно-оптического преобразователя на ПЗС матрицы как контактным методом, так и проекционным. Проведен сравнительный анализ полученных характеристик с учетом технических требований для стрик-камеры и предложен способ улучшения качества изображения с минимальным количеством шумов, оптимальным динамическим диапазоном и временной разверткой.

N.A. KLEKOVA, V.N. ALEKSEVA, T.A. DALBERG, Z.B. ZYDRABYN, N.A.  
KUTSEKOBYSKIY, M.M. POLOZOVA

*Russian Technological University MIREA, Moscow, Russia*

## **COMPARISON OF CONTACT AND PROJECTION METHODS OF DOCKING CCD SENSORS FOR READING IMAGES FROM THE OUTPUT SCREEN OF A STREAK CAMERA**

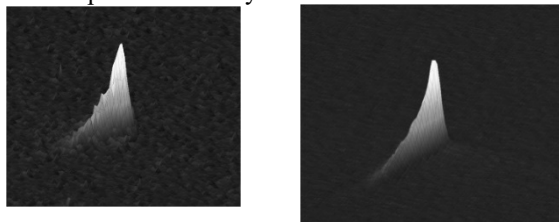
A search and selection of reading devices was carried out, the resolution of which, with a threefold margin, exceeds the requirements for the resolution of the image converter tube, the highest possible sensitivity, a dynamic range of more than  $10^4$  and with built-in correction of distortions to solve various problems, including laser thermonuclear fusion synthesis. A qualitative assessment of the characteristics of these reading devices was carried out. The issues of transferring images from the screen of an electron-optical converter to a CCD sensor using both the contact method and the projection method are considered. A comparative analysis of the obtained characteristics was carried out taking into account the technical requirements for a streak camera and a method was proposed to improve image quality with a minimum amount of noise, optimal dynamic range and time sweep.

При использовании ПЗС матриц в проекционном способе наблюдается явление потери части излучения в пространстве, что сказывается на качестве получаемого изображения и является основной проблемой, на которую было направлено наше исследование [1]. Для устранения этой проблемы применяется контактный метод съемки с использованием фоконов, при котором весь излучаемый поток направляется через оптоволокно на считывающее устройство.

Применение КМОП и ПЗС матриц в стрик-камерах обеспечивает высокий динамический диапазон и пространственное разрешение. Однако при использовании проекционного метода с использованием оптики переноса изображение претерпевает искажения, такие, как подушкообразная дисторсия, виньетирование.

В нашей работе предложен способ улучшения качества изображения при помощи контактного метода. Его суть заключается в том, что вместо проекционной оптической системы к поверхности ПЗС матрицы пристыковывается фокон. Этот способ позволяет уменьшить фоновый шум и скорректировать аберрации за счет того, что излучение поступает на считывающее устройство напрямую с минимальными потерями в отличие от проекционного метода. Была разработана конструкция модульной системы считывания, предусматривающая использование сменных матричных фотоприемников и выносной фотоприемной головки.

В работе было также предложено охлаждение матрицы с целью увеличения ее чувствительности. В случае использования стрик-камеры с охлаждаемой матрицей уровень шумов сенсора может быть снижен до значения менее 1 электрона на ячейку, в то время как в некоторых других камерах при нормальных условиях этот показатель составляет 3 электрона на ячейку и более.



*Рис.1 Изображения, полученные с фоконом, состыкованным с матрицей (а) и с использованием проекционной системы (б)*

*Список литературы*

1. Методы повышения точности определения ориентации космических аппаратов при использовании оптических звездных датчиков с электронно-оптическими преобразователями / М. А. Карпов, Е. В. Егорова, В. И. Нефедов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 27-31.

А.П. ЛАСКОВНЕВ<sup>1</sup>, М.И. МАРКЕВИЧ<sup>1</sup>, В.И. ЖУРАВЛЕВА<sup>2</sup>, Д.В. ЖИГУЛИН<sup>3</sup>, А.Б. КАМАЛОВ<sup>4</sup>,  
Д.Ж. АСАНОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

<sup>3</sup>НПО «Интеграл», Минск, Беларусь

<sup>4-5</sup> Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза Узбекистан  
e-mail: [chaplanov@gmail.com](mailto:chaplanov@gmail.com)

## ЛАЗЕРНОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ Cu В ВОДНОЙ СРЕДЕ В ДВУХИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлены результаты исследований морфологии поверхности медной мишени в водной среде под воздействием излучения лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса~ 0,05Дж). Показано, что в процессе лазерной абляции происходит микро - и наноструктурирование поверхности мишени, формируется набор сферических наночастиц различного размера.

A.P. LASKOVNEV<sup>1</sup>, M.I. MARKEVICH<sup>1</sup>, V.I. ZHURAVLEVA<sup>2</sup>, D.V. ZHIGULIN<sup>3</sup>, A.B. KAMALOV<sup>4</sup>, D.J. ASANOV<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Physical and Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>NPO "Integral", Minsk, Belarus

<sup>4-5</sup>Nukus State Pedagogical Institute named after Azhiniyaz Uzbekistan

## LASER NANOSTRUCTURING OF A Cu SURFACE IN AN AQUEOUS MEDIUM IN A DOUBLE-PULSE INFLUENCE MODE

The results of studies of the morphology of the surface of a copper target in an aqueous environment under the influence of radiation from a yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode (pulses separated by a time interval of 3  $\mu$ s, pulse duration 10 ns, pulse repetition rate 10 Hz, energy single pulse~0.05 J). It has been shown that during laser ablation, micro- and nanostructuring of the target surface occurs and a set of nanoparticles of various sizes is formed.

В настоящее время интерес к лазерной модификации поверхности значительно возрастает, что обусловлено существенным изменением их оптических, механических и других физических свойств. Значительные изменения физических свойств материала в процессе нано и микро структурирования лазерным воздействием показывают возможность их использования в ряде технологий. Так, при образовании нано - микро структур на поверхности медной мишени может быть достигнуто увеличение поглощения. Существенным стимулом для лазерной модификации поверхности материалов в настоящее время является прогресс в развитии лазерных технологий[1].

Цель работы – нано - микро структурирование поверхности меди при воздействии лазера на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующего в двухимпульсном режиме в водной среде и исследование морфологии поверхности[2].

В качестве мишени использовали медную пластину (20×10×10 мм). Пластины погружали в дистиллированную воду, которая принудительно не перемешивалась. Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10нс, частота следования импульсов 10Гц, энергия одиночного импульса~ 0,05Дж)[3]. Образованная в результате испарения материала мишени под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц материала, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции. Образцы Cu обрабатывали лазерным излучением с плотностью мощности  $3 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> при времени экспозиции 5 минут. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе S-4800 (фирма «НИТАСН», Япония). Полученные субмикронные структуры на поверхности образовывались при наличии расплава в зоне воздействия и в режиме абляции. Размер кратеров составляет от 0,8-3,1 мкм, выступы диаметром 100-250 нм, длиной до 1 мкм. Важным свойством данной модификации поверхности является наличие наночастиц круглой формы и агломератов наночастиц (8-600 нм), покрывающих все выпуклости и впадины микро структур.

### Список литературы

1. Анисович А.Г., Маркевич М.И., Журавлева В.И., Асанов Д.Ж., Камалов А.Б. Диагностика наночастиц, полученных методом лазерной абляции // Научно - практический журнал. Неразрушающий контроль и диагностика. 2022, № 1, с. 12-16.

2. Маркевич М.И., Чапланов А.М. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. 2016, №1, с. 28-35.

3. Маркевич М.И., Асанов Д.Ж., Камалов А.Б. Формирование наночастиц в водной среде из мишени силумина // Наука и общество научно-методический журнал. 2023, №1, с 22-24.

В.П. БИРЮКОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ С ДОБАВКАМИ КАРБИДОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ

В работе рассмотрен процесс лазерной наплавки образцов стали 40X13 с использованием непрерывного излучения и поперечных высокочастотных колебаний луча с частотой 224 Гц. Определено на коэффициенты трения, нагрузку заедания и износостойкость. Показано, что применение предварительно нанесенного первого слоя существенно улучшает качество наплавки основного покрытия.

V.P. BIRYUKOV

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

## IMPROVING THE RELIABILITY OF SPLINED JOINTS DURING LASER QUENCHING

The paper considers the process of laser surfacing of 40Kh13 steel samples using continuous radiation and transverse high-frequency beam vibrations with a frequency of 224 Hz. It is determined for friction coefficients, jamming load and wear resistance. It is shown that the use of a pre-applied first layer significantly improves the quality of the surfacing of the main coating.

Традиционно для покрытий деталей атомных электростанций использовали только один материал, который мог выжить в этой крайне агрессивной среде: стеллитовые наплавочные сплавы на основе кобальта. Однако существует большая проблема со сплавами на основе кобальта. Воздействие на кобальт потока нейтронов приводит к образованию радиоизотопа кобальт-60 [1]. Наплавочный сплав должен обладать отличной стойкостью к коррозии и окислению, которая обычно достигается добавлением хрома, в основе сплавов может применяться нержавеющая сталь [2].

Эксперименты по лазерной наплавке выполняли на технологическом лазерном автоматизированном комплексе ИМАШ РАН. В качестве материала подложки использовали образцы стали 40X13 с размерами 15×20×70 мм. Для наплавки первого слоя использовали порошковый материал на основе железа с добавками никеля, хрома, ниобия и кремния (Fe-Ni-Cr-Nb-Si) применяемый для поверхностей трения работающих в коррозионных средах при повышенных температурах с размером частиц 50-130 мкм. Для наплавки износостойких покрытий использовали порошки с никель – хромовой матрицей (Ni-Cr-B-Si) с добавлением сферических частиц карбидов вольфрама (WC) 40 масс.% с фракцией 40-150 мкм. Лазерную наплавку проводили при плотности мощности излучения 30-70 Вт/мм<sup>2</sup>, скорости перемещения луча 4-7 мм/с, диаметром лазерного пятна 1,9-3,2 мм. Образцы для испытаний на трение и износ обрабатывали на оптимальных режимах и шлифовали в один размер, с последующей доводкой шероховатости поверхности на наждачной бумаге Р600. Триботехнические испытания проводили на машине трения по схеме плоскость (наплавленный образец) – торец кольцевой поверхности втулки контрообразца (сталь 40X, 49-54HRC). На рис. 1 представлены графики кинетического индентирования карбида вольфрама (рис. 1, а) и материала основы (рис. 1, б). Высота и ширина наплавленных валиков при наплавке расфокусированным и колеблющимся лучом составила составляла 0,65-0,7, 0,64-0,69 мм и 1,9-2,5 и 3,3 – 4,7 мм соответственно.

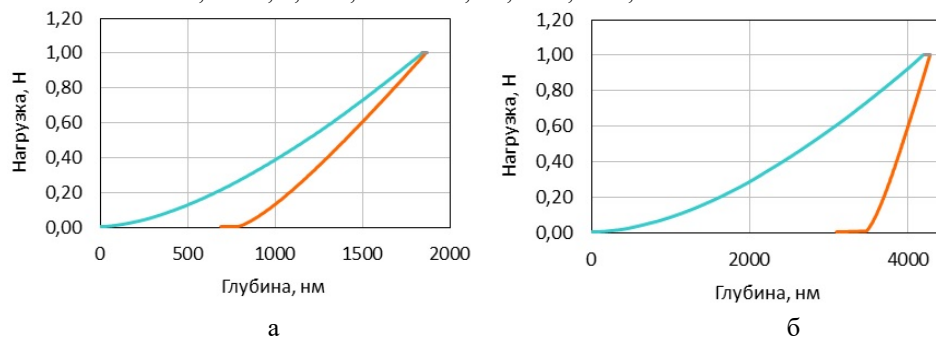


Рис. 1. Кривые кинетического индентирования: а – карбид вольфрама, б – сталь 40X13

Результаты триботехнических испытаний показали значительное повышение износостойкости, задиростойкости наплавленного основного покрытия с карбидами вольфрама и первого слоя по сравнению с материалом основы.

### Список литературы

1. Dufrane K.F., Ocken H. // Wear. 1985. Vol. 101. P. 13–31.
2. Smith R., Doran M., Gandy D., Babu S., Wu L., Ramirez A.J., Anderson P.M. // Mater. Des. 2018. Vol. 143 P. 38–48.

В.П. БИРЮКОВ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
Москва

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКЕ

В работе рассмотрен процесс лазерного упрочнения образцов стали 42ХН2МА с использованием непрерывного излучения и поперечных колебаний луча с частотой 223 Гц. Определено влияние режимов обработки на параметры отклика системы глубину и ширину зон лазерной закалки. Показано, что применение поперечных колебаний луча повышает микротвердость, площадь закаленного слоя, его равномерность и сохраняет геометрическую форму профиля шлица по сравнению с обработкой дефокусированным пучком.

V.P. BIRYUKOV

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

## IMPROVING THE RELIABILITY OF SPLINED JOINTS DURING LASER QUENCHING

The paper considers the process of laser hardening of 42KhN2MA steel samples using continuous radiation and transverse beam vibrations with a frequency of 223 Hz. The influence of processing modes on the response parameters of the system, the depth and width of the laser quenching zones, is determined. It is shown that the use of transverse beam vibrations increases the microhardness, the area of the hardened layer, its uniformity and preserves the geometric shape of the slot profile compared with processing with a defocused beam.

Шлицевые соединения благодаря своей компактной конструкции и простоте монтажа нашли широкое применение в области механики. Существует множество причин износа шлицев [1], и учеными по всему миру были проведены обширные исследования по этой теме. В работе [2] экспериментальными методами изучили характер повреждений на поверхностях прямозубых и барабанно-зубчатых шлицевых муфт при различных рабочих нагрузках, выявив различные типы повреждений между прямозубыми и барабанно-зубчатыми шлицевыми соединениями.

Эксперименты по лазерному упрочнению проводили на лазерном автоматизированном технологическом комплексе ИМАШ РАН. В качестве материала подложки использовали образцы стали 42ХН2МА с размерами образцов 12×20×70 мм. Для повышения поглощательной способности на образцы наносили покрытие СГ504 на водной основе, с последующей его сушкой при 80 °С в течение 30 минут. Лазерное упрочнение выполняли при мощности излучения 700-1000 Вт, скорости перемещения луча 5-10 мм/с, диаметром лазерного пятна 3,2-5,4 мм. Окончательную обработку партии образцов для триботехнических испытаний выполняли на оптимальных режимах. Испытания выполняли на машине трения с использованием схемы плоскость (Образец стали с лазерным упрочнением) – кольцевая поверхность торца втулки контрообразца (сталь 40Х, 49-54HRC). На рис. 1 представлен микрошлиф закаленного лазером образца. Глубина и ширина зоны упрочнения при обработке расфокусированным и колеблющимся лучом составила 0,48-0,89 и 0,47-1,17 мм и 1,9-3,5 и 3,2-5,9 мм соответственно. Микротвердость при упрочнении колеблющимся лучом варьровалась в пределах 6480-7560 МПа, что на 700-860 МПа выше, чем при обработке расфокусированным лучом. Качество профиля шлица сохраняется при упрочнении колеблющимся лучом, и кромка частично испаряется при обработке круглым пятном (рис. 1, а).

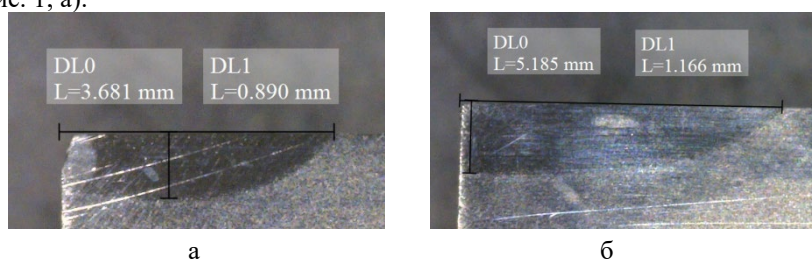


Рис. 1. Микрошлифы зон лазерной закалки стали 42ХН2МА: а-расфокусированным лучом, б-колеблющимся лучом  
Из проведенных испытаний следует, что интенсивность изнашивания материала основы стали 42ХН2МА (262-296 HV) составила  $2,17 \cdot 10^{-9}$ , упрочненных расфокусированным лазерным лучом образцов и с поперечными колебаниями с твердостью (660-770 HV) и (689-785 HV) -  $0,57 \cdot 10^{-9}$  и  $0,45 \cdot 10^{-9}$  соответственно. Минимальные коэффициенты трения получены при 100% площади закалки поверхности образцов.

Список литературы

1. Curà F., Mura A. // Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 45. P. 504-512.
2. Wu Y., Liang Y, Yin C., Zhang F, Chen B., Yang S. // [Engineering Failure Analysis](#). 2023. Vol. 146. P. 107113.



К.М. БУЛАТОВ, П.В. ЗИНИН

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

## МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНАЯ КАМЕРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ ВО ВРЕМЯ ЛАЗЕРНОГО НАГРЕВА

Описывается метод дистанционного измерения распределения температуры без знания излучательной способности, с использованием мультиспектральной камеры. Показана калибровка мультиспектральной камеры по эталонному температурному источнику излучения для работы со спектральным отношением. В работе проведен анализ применения модифицированного метода пирометрии спектрального отношения. Показано, что этот метод позволяет определить распределение температуры в области нагрева мощным лазером образца в режиме реального времени в ячейках высокого давления.

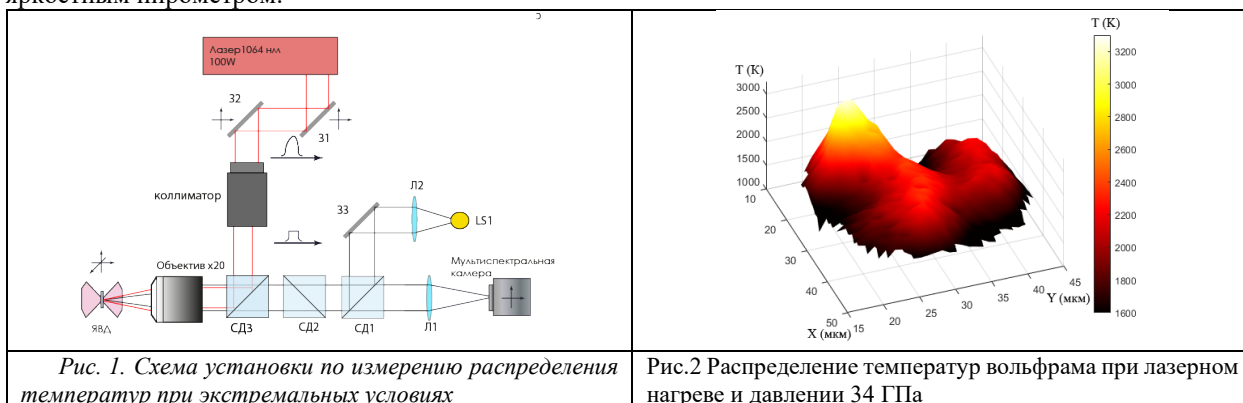
K.M. BULATOV, P.V. ZININ

Scientific-Technological center of unique instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## MULTISPECTRAL CAMERA FOR STUDYING PHASE TRANSITIONS UNDER LASER HEATING

A method for remote measurement of temperature distribution without knowledge of the emissivity, using a multispectral camera, is described. Calibration of a multispectral camera using a reference temperature radiation source to work with a spectral ratio is shown. The paper analyzes the application of a modified spectral ratio pyrometry method. It is shown that this method makes it possible to determine the temperature distribution in the heating region of a high-power laser sample in real time in high-pressure cells.

Динамическое измерение поверхностного распределения температуры нагретых тел с неизвестным коэффициентом излучения востребованы во многих областях науки и техники, включая геофизику [1], синтез новых материалов, и изучению фазовых переходов [2] и т.д. Целью данной работы является разработка нового метода измерения распределения температуры на поверхности твердых тел в ячейках высокого давления при лазерном нагреве. В работе показано, что применение мультиспектральной камеры позволяет изучать фазовые переходы с временным разрешением 0,1 мс. В основе измерения распределения температур лежит метод спектральных отношений. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. В эксперименте использовалась мультиспектральная видеокамеры Ximea, позволяющая получать изображения с частотой до 300 Гц. Величина погрешности измерений температуры составляет 3-10%, что подтверждено измерениями яркостным пирометром.



В качестве примера использования предложенного метода приведены результаты измерения температуры плавления вольфрама в условиях высоких давлений. На рис.2 представлена температурная карта нагретого лазерным излучением вольфрама в ячейке высокого давления. Высокая скорость получения распределения температуры нагретых тел при сравнительно невысокой погрешности измерений температуры делают предложенный метод перспективным для исследования быстропротекающих процессов, происходящих в процессе нагревания твердых тел лазерами, таких как плавление и фазовые переходы.

### Список литературы

- [1] Bulatov KM, Zinin PV, Machikhin AS, Kutuza IB, Multi-Spectral Camera for Dynamic Measurements of High Temperature Distribution over Solid-Body Surfaces, Light & Engineering, 2022; 30(6): 67-70. DOI: 10.33383/2022-081
- [2] Zinin PV, Bulatov KM, Bykov AA, Mantrova YuV, Kutuza IB, Remote measurement of the temperature distribution on the surface of solids under high-power laser irradiation. Physics-Uspekhi 2022; 65(8): 852-863. DOI: 10.3367/UFNe.2021.05.038996

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКА ЧУГУНА, ПОЛУЧЕННОГО ЛИТЕЙНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ, ОПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

В работе проводили исследование износостойкости покрытий из порошка чугуна, легированного вольфрамом, полученного литейно-металлургическим методом, оплавленного лазерным лучом.

O.G. DEVOINO, A.G. SLUTSKY, V.A. SHEINERT, E.A. VANYUK

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

### WEAR RESISTANCE STUDY OF GAS-THERMAL COATING MADE FROM CAST IRON POWDER, OBTAINED BY FOUNDRY-METALLURGICAL METHOD, AND MELTED BY LASER BEAM

The study investigates the wear resistance of coatings made from tungsten-alloyed cast iron powder, obtained by cast metallurgical method, melted by a laser beam.

При восстановлении (упрочнении) деталей машин возникают ограничения по себестоимости операций, связанные с высокими ценами на фирменные порошки. В связи с этим изыскиваются возможности получения порошков из более дешевых материалов и методов их производства. В данной работе проводится оценка возможности получения порошков из чугуна, легированного вольфрамом, полученного литейно-металлургическим методом, для создания газотермических покрытий. При газотермическом напылении покрытий из указанного порошка наблюдалась низкая прочность сцепления, в связи с чем, для повышения прочности сцепления и физико-механических свойств использовали лазерное оплавление покрытий [1].

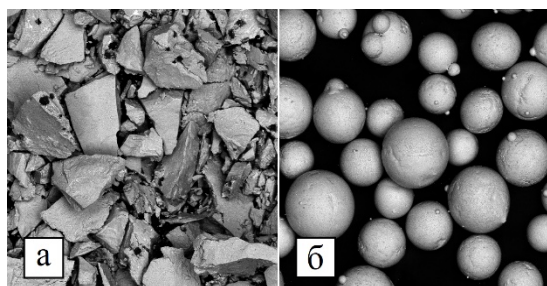


Рис. 1 – Изображения на сканирующем электронном микроскопе VEGA TESCAN при увеличении 1:500: а) порошок из чугуна с вольфрамом, полученного литейно-металлургическим методом; б) эталонный порошок ПГ-СР4

Для получения порошка производилась прямая плавка (металлургический синтез) исходных материалов с получением компактного слитка, последующее его дробление и размол до необходимого гранулометрического состава. После размола получили порошок из чугуна, легированного вольфрамом (основа Fe, 2...2,5%С, 5...6%Cr, 4...6%Si, 1...1,5%B, 7...10%W, 4...5%Co, Mo, V) с размером частиц менее 80 мкм (рис. 1,а). Для сравнения результатов исследований на износостойкость покрытий применяли эталонный порошок ПГ-СР4 (основа Ni; 13,0-17,0%Cr; 0,6-1,0% C; 3,0-5,0% Si; 2,5-4,0% B; 4,0% Fe) с размером частиц 40...100 мкм (рис. 1,б).

Согласно данным, представленным на рисунке 1а, частицы порошка из чугуна, легированного вольфрамом, полученного литейно-металлургическим методом, имеют осколочную форму в отличие от эталонного порошка ПГ-СР4, имеющего сферическую форму частиц (рис. 1б), что снижает сыпучесть материалов. Тем не менее, уровень их технологических свойств достаточен для последующего газотермического нанесения покрытий.

Согласно данным, представленным на рисунке 1а, частицы порошка из чугуна, легированного вольфрамом, полученного литейно-металлургическим методом, имеют осколочную форму в отличие от эталонного порошка ПГ-

Процесс нанесения покрытий включал газопламенное напыление и лазерное оплавление. Испытания на износостойкость проводили экспресс - методом на машине торцового трения по схеме диск — втулка без смазочных материалов.

При исследовании износостойкости покрытий из вышеуказанных порошков установлено повышение износостойкости экспериментального покрытия в 1,2 раза по сравнению с эталонным (рис. 2). Полученные результаты предварительных исследований и сравнение себестоимости формируемых покрытий показали перспективность работ по разработке технологии получения износостойких покрытий на основе чугуна плазменным напылением с последующей лазерной обработкой.

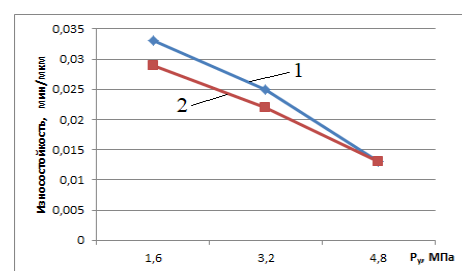


Рис. 2 – Зависимость износостойкости от удельного давления в зоне контакта диск-втулка: 1 - покрытие из порошка чугуна, легированного вольфрамом; 2 –

#### Список литературы

1. Девойно, О. Г. [и др.] /Технология формирования износостойких покрытий на железной основе методами лазерной обработки / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, А.С. Калиниченко, В.В. Жарский, А.Г. Василенко. – Минск : БНТУ, 2020. – 280 с.

А.И. ВЕРЕМЕЙЧИК, Б.Г. ХОЛОДАРЬ, М.В. НЕРОДА  
Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКАЛКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СКАНИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

С целью разработки компьютерной программы расчета температурного поля в зоне термического влияния проведено механико-математическое моделирование процесса поверхностной закалки деталей излучением оптоволоконного лазера со сканирующей лазерной головкой.

A.I. VERAMEICHYK, B.G. HOLODAR, M.V. NERODA

*Brest State Technical University, Brest, Belarus*

## SIMULATION OF THE HARDENING USING SCANNING RADIATION OPTICAL FIBER LASER

In order to develop a computer program for calculating the temperature field in the thermally affected zone, mechanical and mathematical modeling of the process of surface hardening of parts using the radiation of a fiber-optic laser with a head scanning the laser beam was carried out.

Для движущихся источников энергии, например, при поверхностной закалке деталей излучением оптоволоконного лазера со сканирующей лазерной головкой, при вычислениях температурного поля в зоне термического влияния необходимо задание траектории движения лазерного луча. При лазерном сканировании наряду с движением ядра потока вдоль намеченной дорожки оно одновременно периодическим образом смещается в поперечном направлении, двигаясь по траектории, которую можно представить как набор выходящих одна из другой последовательных поперечных линий, причем по условиям работы установки в точках этих линий интенсивность энергетического воздействия может изменяться. Кроме того, при малом радиусе кругового ядра лазера для обеспечения возможности создавать в материале тепловое поле определенной интенсивности при заданной номинальной мощности установки производится отключение потока лазерного излучения после прохождения нескольких поперечных линий, т.е. обрабатываемая дорожка представляет собой последовательность одинаковых по воздействию зон, состоящих из участков непосредственного нагружения (пятно сканирования) и равных с ними по времени ненагруженных промежутков.

В качестве исходных кинематических данных при моделировании принимались скорость движения лазерной головки вдоль дорожки, ширина дорожки, число поперечных линий на пятне воздействия и частота повторений прохождения двух взаимосвязанных линий. Это позволило определить период времени, соответствующий возврату оси луча в точку с фиксированной поперечной координатой. Задаваемое на установке число линий  $N_{lin}$  может быть нечетным или четным (во время испытаний число линий соответствовало значениям 7 и 10), поэтому на пятне сканирования уместается целое или полуцелое число периодов поперечного движения луча, равное  $N_{lin}/2$ . В связи с тем, что оплавление поверхности обрабатываемого материала происходит в круге определенного радиуса, а не только в точках попадания оси луча, при небольших скоростях движения головки лазера происходит непрерывное слияние зон обработки (пятно плюс промежутки), поэтому уточнение ситуации может быть проведено только при достаточно больших скоростях движения лазерной головки, когда пятно нагрева и промежутки между ними явным образом выделяются. Проведенные эксперименты позволили определить продольную составляющую скорости сканирования, которая является одинаковой для любых скоростей движения лазерной головки при одном и том же числе линий на пятне и частоте их прохождения. Наличие постоянной продольной и периодической поперечной скоростей (компонент) сканирования позволяет считать ось луча при сканировании движущейся вдоль дорожки по некоторой синусоиде.

С точки зрения кинематики движение оси луча представляется как сумма продольного переносного и относительных продольного и поперечного движений, причем скорость переносного движения совпадает со скоростью лазерной головки. Для определения продольной относительной скорости проведены эксперименты по нагружению плоского образца со скоростью перемещения головки  $V_e = V = 20000 \text{ мм/мин}$ . Несмотря на то, что к концу дорожки след становится более оплавленным за счет общего повышения температуры образца с течением времени теплового воздействия, при большом числе образовавшихся зон обработки можно с достаточной точностью определить длину одной зоны как отношение общей длины дорожки ( $L \approx 198 \text{ мм}$ ) к числу этих зон ( $N=18$ ). После этого из выражения для длины зоны  $L_z = V_e \frac{N_{lin}}{2} T_{laz} + (V_e + V_r) \frac{N_{lin}}{2} T_{laz}$

определена относительная скорость  $V_r = 2 \left( \frac{Lz}{N_{lin} T_{laz}} - V_e \right)$ . Найденное значение  $V_r$  можно использовать для

режимов с другими значениями скорости переносного движения. На основе построенной кинематической модели разработана программа для определения температуры тела при сканирующей лазерной закалке.

К.А. ВОРОНКО, А.С. ЩЕКИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МЕТОД ПРЕЦИЗИОННОЙ МИКРОСВАРКИ ЦИРКОНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ND:YAG ЛАЗЕРА С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ**

В работе были исследованы базовые принципы лазерной микросварки. Изучено влияние энергии в импульсе на геометрические параметры сварного соединения. Также был найден оптимальный режим работы используемой установки. Полученные результаты можно применять на практике при создании неразъемных соединений, а также для дальнейших исследований с целью улучшения качества сварных соединений.

K.A. VORONKO, A.S. SHCHEKIN

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **METHOD OF PRECISION MICROWELDING OF ZIRCONIUM USING A LAMP-PUMPED ND:YAG LASER**

The work examined the basic principles of laser microwelding. The influence of energy in a pulse on the geometric parameters of a welded joint was studied. The optimal operating mode of the installation used was also found. The results obtained can be used in practice when creating permanent joints, as well as for further research in order to improve the quality of welded joints.

Лазерные технологии являются одними из наиболее перспективных и востребованных технологий в современном производстве. Высокая плотность мощности лазерного луча — одно из важнейших преимуществ при лазерной обработке. Это свойство позволяет быстро и эффективно обрабатывать различные материалы с высокой точностью и качеством. Сварка металлов была одним из первых промышленных применений лазеров. Этот процесс задействован в различных отраслях, в том числе и в атомной.

В эксперименте использовалась система лазерной сварки «Фотон Компакт» с импульсным Nd:YAG лазером, имеющим максимальную пиковую мощность 4 кВт и длину волны 1,064 мкм. Лазер имеет перечень базовых настроек: длительность импульса, частота следования импульсов и процент от максимальной мощности при заданных параметрах. Особенностью лазера является возможность изменения ширины гауссова пучка и формы импульса. В качестве исследуемого материала была выбрана циркониевая пластинка толщиной 0,5 мм и тонкостенная трубка с толщиной стенки 0,9 мм из сплава Э110.

При выполнении сварного соединения, можно выделить несколько причин, ведущих к выходу из строя тепловыделяющих сборок:

- снижение прочностных и коррозионных свойств соединений вследствие наличия загрязнений в зоне сварки;
- небольшие «подрезы» в сварных швах, которые не удается обнаружить неразрушающими методами контроля ввиду их малых геометрических размеров, но они все же являются концентраторами напряжений и приводят к разрушению за счет экстремальных условий эксплуатации;
- разрушения, вызванные повышенной твердостью, и снижение пластичности металла оболочек ТВЭЛов в зоне термического влияния и вблизи сварных швов с «непроваром».

Для решения этих проблем и модернизации технологии сварки предпринимаются следующие действия:

- создание условий для поддержания чистоты свариваемого металла, оборудования и расходных материалов на протяжении всех технологических операций;
- повышение стабильности качества соединений

Последний пункт является наиболее интересным, так как более высокое качество соединений можно получить путем управляемого ввода энергии в зону сварного шва. В свою очередь контроль ввода энергии можно осуществлять при помощи множества параметров. В данной работе исследовалось влияние изменения мощности подаваемого излучения в зону расплава. Данный параметр позволяет получать два вида сварных соединений, отличающихся глубиной проплавления. Также изучалась зависимость глубины проплавления от длительности импульса. Существенно влияет на качество соединения также форма подаваемого импульса и внешние условия, а конкретно присутствие или отсутствие атмосферы инертного газа.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДВУХВОЛНОВЫМ ПИРОМЕТРОМ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОМЕТРА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Рассмотрена возможность измерения близкой к истинной температуры нагретой поверхности при выборе узких спектральных интервалов на спектрах теплового излучения и предположения о равенстве неизвестных коэффициентов черноты материалов на краях интервалов.

A.F. GLOVA, A.YU. LYSIKOV, E.D. RADCHENKO, I.D. KLOCHKOV, E.A. BUYANOVA, P.B. PAPIN

CA "State Research Center of Russian Federation Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research", Moscow

## MEASUREMENT THE SURFACE TEMPERATURE WITH A TWO-WAVE PYROMETER BASED ON A DIFFRACTION GRATING SPECTROMETER

The possibility of measurement the temperature of a heated surface close to the true temperature is considered when choosing narrow spectral intervals on the spectra of thermal radiation and assuming the equality of unknown coefficients of blackness of materials at the edges of the intervals.

Измерение температуры  $T$  нагретого тела двухволновым пирометром в области Вина ( $\lambda T \ll hc/k$ ) основано на ее вычислении по выражению [1]:  $T = (hc/k)(\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1}) \cdot \{\ln[b(\lambda_1, T)/b(\lambda_2, T) \cdot \varepsilon(\lambda_2, T)/\varepsilon(\lambda_1, T) + 5 \ln(\lambda_1/\lambda_2)]\}^{-1}$ , где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\varepsilon(\lambda_1, T)$ ,  $\varepsilon(\lambda_2, T)$  и  $b(\lambda_1, T)$ ,  $b(\lambda_2, T)$  – соответственно, коэффициенты черноты и спектральные энергетические яркости излучения для длины волны  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Применение в двухволновом пирометре спектрометра позволяет отстроиться от атомных линий и молекулярных полос, часто возникающих при измерениях и искажающих спектр теплового излучения, а возможность выбора узкого спектрального интервала  $\delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  – исключить отношение неизвестных, как правило, коэффициентов черноты на его краях, полагая  $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$  [2]. При этом отношение яркостей можно заменить на отношение пропорциональных им измеренных интенсивностей излучения.

Отметим, что в [3] предложен другой способ исключения неизвестного коэффициента черноты при измерении температуры в области Вина, но одноволновым пирометром на основе спектрометра. Он основан на измерениях яркости  $b(\lambda, T)$  и построении зависимости  $\ln[\lambda^5 b(\lambda, T)] = \ln[2\varepsilon(\lambda, T)hc^2] - hc/(\lambda kT)$ . Существование в некотором интервале длин волн линейного участка свидетельствует о постоянстве коэффициента  $\varepsilon(\lambda, T)$  на данном интервале, который не влияет на наклон участка и на температуру, определяемую по величине наклона.

Целью данной работы является измерение температуры поверхности металлов двухволновым пирометром на основе спектрометра с измененным по сравнению с [2] алгоритмом вычисления  $T$  при  $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$ : одинаковые интервалы  $\delta\lambda < \Delta\lambda$  равномерно заполняют диапазон  $\Delta\lambda$ . Были выбраны  $\delta\lambda = 10$  нм и  $\Delta\lambda = 70$  нм. Результаты вычислений для каждого значения температуры усредняются и сравниваются с результатами термометрических измерений  $T_{\text{ТП}}$  (рис. 1). Нагрев образцов из стали Ст.3 и Ti осуществляется непрерывным лазерным излучением.

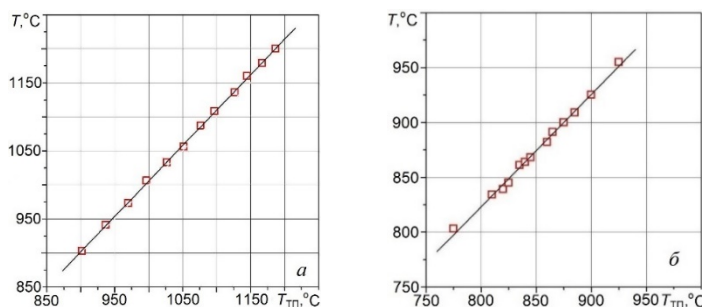


Рис. 1. Сравнение показаний двухволнового пирометра с результатами термометрических измерений для Ст.3 (а) и Ti (б)

Изменение алгоритма привело к уменьшению максимального отличия между  $T$  и  $T_{\text{ТП}}$  для Ст.3 до 1,3%. Что касается максимальной погрешности измерений для Ti (4%), ее можно связать с сильной зависимостью коэффициента черноты от температуры ( $\varepsilon = 0,76-0,3$ ), тогда как для Ст.3 он не зависит от  $T$  ( $\varepsilon = 0,8$ ). Эти данные для  $\varepsilon$  были получены из одинаковых показаний термопары и серийного одноволнового пирометра с подбираемой величиной  $\varepsilon$ .

### Список литературы

1. Лебедева В.В. Техника оптической спектроскопии // Москва, издательство МГУ. 1977.
2. Glova A.F., Lysikov A.Yu., Nelyubin S.S. and others // J. of Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1696. P. 012020.
3. Магунов А.Н. // ПТЭ. 2009. №4. С. 5-28.

## ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ И ФРАГМЕНТАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ ВОЛЬФРАМА

Целью научно-исследовательской работы является исследование процесса формирования наночастиц вольфрама и его соединений в результате лазерной абляции мишеней в жидкости. Предмет исследования – определение зависимости характеристик, получаемых наночастиц от параметров воздействующего на исходный образец фемтосекундного лазерного излучения и окружающей технологической среды. Была создана лабораторная схема и проведены серии экспериментов по синтезу наночастиц при различных комбинациях параметров и условий лазерного воздействия на исходную мишень.

S.V. DIANOV, Y.V. ULYANOV, E.D. TARAKANOV

*State laser polygon "Raduga", Raduzhnyi, Russia*

### LASER SYNTHESIS AND FRAGMENTATION OF TUNGSTEN NANOPARTICLES

The purpose of the research work is to study the formation of tungsten nanoparticles and its compounds as a result of laser ablation of targets in a liquid. The subject of the study is to determine the dependence of the characteristics of the obtained nanoparticles on the parameters of femtosecond laser radiation acting on the initial sample and the surrounding technological environment. A laboratory scheme was created and a series of experiments were conducted on the synthesis of nanoparticles under various combinations of parameters and conditions of laser action on the initial target.

Синтез наночастиц осуществлялась путём абляции материала с поверхности объёмной вольфрамовой мишени в виде прямоугольника с размерами 40 x 40 x 5 мм. Обработка поверхности мишени производилась излучением фемтосекундной лазерной системы ТЕТА-10 [1]. В данной лазерной системе в качестве активной среды используется кристалл калий-гадолиниевый вольфрамат легированный трехвалентными ионами иттербия.

Периодический по текущей фазе характер такого вида искажений позволяет предложить достаточно простой механизм подавления данного вида помех путем Фурье фильтрации измеряемых перемещений. Такой подход применим, когда диапазон регистрируемых перемещений существенно превышает несколько длин волн используемого лазерного излучения. В среде этилового спирта были получены наночастицы вольфрама, в воде – оксида вольфрама, в ацетоне – карбида вольфрама.

В случае абляции лазерным излучением со средней мощностью 1 Вт в среде этилового спирта максимальный диаметр полученных наночастиц 200 нм, минимальный – 20 нм. Средний характерный размер наночастиц соответствует величине около 75 нм, а основная масса частиц имеет диаметр от 50 нм до 100 нм. В случае абляции лазерным излучением со средней мощностью 0,5 Вт формируются в основном наносферы с диаметром от 40 до 150 нм. Максимальный размер единичных структур достигает 250 нм. Очевидно уменьшение среднего диаметра синтезируемых наносфер с увеличением мощности лазерного излучения. Лазерная фрагментация наночастиц в среде этилового спирта приводит к разделению большей части наносфер на структуры с размерами менее 20 нм. В результате получается коллоидный раствор, образующий после высыхания на подложке гелевую пленку. Часть наносфер остается относительно крупными, с диаметрами от 30 до 60 нм.

В случае абляции лазерным излучением со средней мощностью 1 Вт в среде ацетона формируются массивы сферических наночастиц с преобладающим диаметром от 20 нм до 180 нм. Максимальный характерный размер наночастиц достигает 270 нм. Единичные особо крупные отдельные структуры имеют диаметр до 500 нм. Осажденные продукты лазерной абляции лазерным излучением со средней мощностью 0,5 Вт представляют собой массив сферических наночастиц с диаметром от 20 нм до 150 нм. Преимущественный характерный размер наночастиц соответствует величине около 50 нм. Зарегистрированы отдельные наносферы с диаметром до 400 нм. Результаты фрагментации наночастиц карбида вольфрама в коллоидных растворах на основе ацетон-на показали тенденцию по уменьшению диаметров наносфер, аналогичную случаю обработки продуктов лазерной абляции вольфрама в этиловом спирте.

В результате лазерной абляции вольфрама в воде, формируется коллоидный раствор, который после высыхания формирует на поверхности подложки однородную гелиевую пленку. Это указывает на очень малый (порядка 1 нм) размер образующих его наночастиц. При средней мощности лазерного воздействия 1 Вт в гелиевой пленке присутствуют отдельные наносферы с диаметром  $60 \div 100$  нм. Отмечается тенденция слипания наночастиц с образованием конгломератов с характерными размерами до 300 нм. При средней мощности лазерного воздействия 0,5 Вт в гелиевой пленке просматриваются наноструктуры с размерами около 100 нм и присутствуют достаточно крупные наноструктуры как сферичной, так и осколочной формы с характерными размерами от 250 нм до 1 мкм и конгломераты наночастиц с общим размером до 10 мкм. Фрагментация разрушает все наночастицы на части с размерами 10 нм. После высыхания результирующий коллоидный раствор образует тонкую однородную гелевую пленку. Результаты спектрофотометрии показали уменьшение коэффициента поглощения.

#### *Список литературы*

1. Фемтосекундная лазерная система ТЕТА-10: Паспорт. – Москва, Троицк: ООО «АВЕСТА», 2010. – 14 с.

**ХеСl-ЭКСИЛАМПЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ИМПУЛЬСНЫМ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ**

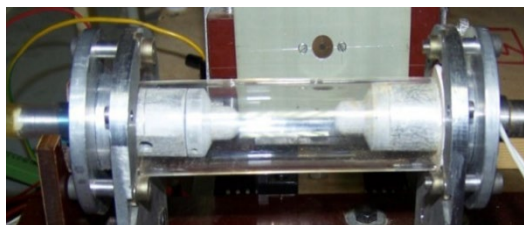
Представлены результаты разработки ХеСl-эксиламп для широкого практического применения. Возбуждение рабочей среды эксиламп осуществлялось импульсным объемным разрядом. Проведена оптимизация состава рабочих смесей. Получена импульсная мощность ультрафиолетового излучения на длине волны 308 нм ~200 кВт.

K.F. ZNOSKO, V.Ch. BELASH

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus***XeCl-EXCILAMPS WITH EXCITATION BY PULSE VOLUME DISCHARGE**

The results of the development of XeCl excilamps for wide practical use are presented. The working medium of the excilamps was excited by a pulsed volume discharge. The composition of working mixtures was optimized. The pulsed power of ultraviolet radiation at a wavelength of 308 nm ~200 kW was obtained.

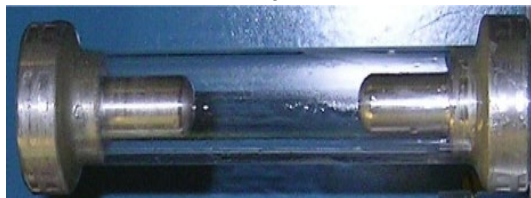
Для ряда практических применений необходимы мощные импульсные некогерентные источники УФ излучения. Одними из наиболее эффективных таких источников излучения являются эксимерные лампы [1]. Они заполнены смесью инертных газов с галогеноносителем. Для их возбуждения применяется барьерный разряд [2-4], емкостный разряд [4-5], импульсный объемный разряд [6-7]. Несмотря на полученные результаты, задача создания высокоэффективных эксиплексных источников УФ излучения до конца не решена. Ниже представлены результаты разработки и исследования эмиссионных характеристик ХеСl эксиламп с возбуждением объемным разрядом.



а



б



в

Рис. 1. Фотографии излучателей эксиламп

На рис. 1 представлены фотографии излучателей ХеСl эксиламп. В основе излучателя лежала кварцевая трубка, на торцах которой располагались электроды. Профиль электродов обеспечивал максимальную плотность тока в приосевой зоне. При создании систем возбуждения разряда в эксилампах использовались наработки, полученные при разработке и исследовании эксимерных лазеров. По методике [8-9] осуществлялось предварительное компьютерное моделирование эксиламп. Задавались геометрические размеры, состав и давление рабочей смеси и рассчитывались параметры системы возбуждения разряда, которая была выполнена по типу LC-контура или LC-инвертора.

Проведена оптимизация выходных характеристик эксиламп. В исследованиях использовались трехкомпонентные рабочие смеси типа НСl:Хе:Не и ультрафиолетовое облучение разрядного промежутка. Для эксилампы, представленной на рис. 1б, при использовании зарядного напряжения 25 кВ и межэлектродного расстояния 60 мм, оптимальным составом рабочей среды является: НСl - 2,0 Торр, Хе - 10 Торр и Не - 600 Торр. Для эксиламп (рис. 1а и 1в) оптимальный состав рабочей смеси несколько отличался. Максимальная полная импульсная мощность ХеСl эксилампы составляла ~200 кВт при энергетической эффективности более 4 %, что соответствует лучшему значению эффективности эксиламп с возбуждением импульсным разрядом. Длительность импульсов излучения зависела от параметров системы возбуждения и находилась в диапазоне 100-250 нс.

*Список литературы*

1. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А. и другие // Успехи физических наук. 2003. Т.173. с. 201–217.
2. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2006. Vol. 39. P. 3609–3614.
3. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 115. С. 33–42.
4. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат. фіз. інфарм., выліч. тэхн. і кір. 2015. № 1 (186). С. 113–124.
5. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат. фіз. інфарм., выліч. тэхн. і кір. 2018. Т. 8, № 3. С. 102–112.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серія 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 2. С. 81–91.
7. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат. фіз. інфарм., выліч. тэхн. і кір. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.
8. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.
9. Volodenkov A., Anufrik S., Znosko K. // High Temper. Material Processes. 2017. Vol. 21, No 4. P. 377–390.

## ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ЭКСПЛЕКСНОГО ЛАЗЕРА С ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИЕЙ 3 ДЖ

Представлены результаты исследования характеристик мощного ХеС1-лазера. Его особенностью является модульное выполнение системы возбуждения разряда. Установлены зависимости его выходных характеристик от состава и давления активной среды, параметров системы возбуждения. Максимальная энергия генерации ~3 Дж при длительности импульса ~120 нс.

S.S. ANUFRIK, A.P. VOLODENKOV, K.F. ZNOSKO  
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus  
**GENERATION CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DISCHARGE  
EXCIPLEX LASER WITH OUTPUT ENERGY 3 J**

The results of a study of the characteristics of a high-power XeCl laser are presented. Its feature is the modular design of the discharge excitation system. The dependences of its output characteristics on the composition and pressure of the active medium and the parameters of the excitation system have been established. The maximum generation energy is ~3 J at a pulse duration of ~120 ns.

Хотя в УФ области спектра существует ряд источников когерентного излучения, однако в наносекундном диапазоне эксиплексные лазеры до настоящего времени являются одними из самых мощных и широко применяются на практике [1]. В этой связи разработка и исследование лазеров этого типа является актуальной задачей.

Электрическая схема и конструкция ХеС1 лазера описаны в [2]. При его разработке использовались подходы, применяемые ранее, при разработке лазеров меньшей мощности и эксиламп [3-5]. Предварительное компьютерное моделирование характеристик лазера проводилось на основе методики изложенной в [6]. В лазере использованы шесть модулей работающих на общую нагрузку. Синхронизация срабатывания разрядников модулей была не хуже 5 нс. Это позволило снизить рабочее напряжение до 20-36 кВ при межэлектродном промежутке в 70 мм.

На рис. 1 приведены зависимости энергии генерации ХеС1-лазера от давления газовых компонент составляющих активную среду. На зависимостях энергии генерации от давления НС1 и Хе наблюдаются выраженные максимумы. С ростом давления Ne, независимо от давлений  $P_{\text{НС1}}$  и  $P_{\text{Хе}}$ , энергия генерации растет практически линейно. При  $P_{\text{Ne}} > 3$  атм. наблюдается слабая тенденция к ее выходу на насыщение. В диапазоне зарядных напряжений 24-36 кВ наблюдался практически линейный рост выходной энергии лазера. Импульс генерации имел крутой фронт, небольшое плато, пологий спад и «хвост», обусловленный током разряда емкостей после их перезарядки. Длительность импульса генерации составляла ~120 нс по полувысоте. Форма и длительность импульсов генерации коррелировала с импульсами и амплитудой разрядного тока. Максимальная выходная энергия составляла 3 Дж на смеси состава НС1:Хе:Ne – 1:15:3000 при общем давлении смеси 4 атмосферы и зарядном напряжении 36 кВ.

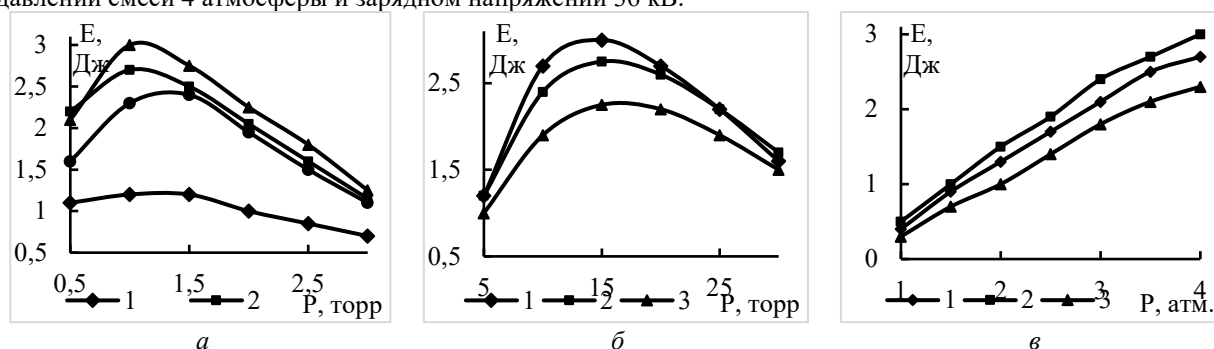


Рис. 1. Зависимости энергии генерации ХеС1-лазера от давлений НС1 (а), Хе (б) и Ne (в) в рабочей смеси

### Список литературы

1. Delmdahl R., Patzel R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. No 3. P. 034004.
2. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. IX Междунар. конф. ЛаПлаз-2022: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С.89.
3. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Володенков А.П. // Журнал прикладной спектроскопии. 1999. Т. 66, №5. С.702-707.
4. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Znosko K.F. // **Journal of Optical Technology**. 2000. V. 67, № 11. P. 961-967.
5. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 2. С. 81–91.
6. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // **Russian Physics Journal**. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.



Е.А. КОВАЛЬ

Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

## ВЫСТРАИВАНИЕ И ОРИЕНТАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ МОЛЕКУЛ ДВУХЦВЕТНЫМИ ТРАПЕЦИЕВИДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Теоретически исследовано выстраивание и ориентация линейных молекул с помощью двухцветных трапециевидных лазерных импульсов. Показано, что использование лазерного импульса с трапециевидной формой огибающей увеличивает максимальную степень выстраивания при той же интенсивности и длительности по сравнению с лазерным импульсом гауссовой формы. Исследовано влияние длительности импульса на максимальные значения выстраивания и ориентации молекул. Показано влияние температурных эффектов.

E.A. KOVAL

Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

## ALIGNMENT AND ORIENTATION OF LINEAR MOLECULES BY TWO-COLOR TRAPEZOIDAL LASER PULSES

The alignment and orientation of the linear molecule by the two-color trapezoidal laser pulses were theoretically investigated. The use of the trapezoidal shape of a laser pulse enhances the maximum alignment degree for the same intensity and duration comparing to the Gaussian laser pulse. Influence of pulse duration on the maximum degrees of molecule alignment and orientation was investigated. The influence of temperature effects is shown.

Recently, a rapid growth of theoretical and experimental studies of the alignment and orientation in laser and combined fields have been seen. The alignment and the orientation of neutral molecules under free of external static electric field conditions depends on the many laser field parameters such as the intensities, the frequencies, the shapes and the duration times of laser pulses, time of delay between the pulses.

The envelope shapes used by other authors are mainly the Gaussian,  $\text{sech}^2$ , square shapes. We investigate field-free molecular alignment and orientation by a two-color laser field with the trapezoidal shape of the pulse [1].

Our results showed that the trapezoidal laser pulse allows to enhance the maximum alignment degree for the same intensity and duration comparing to the conventional Gaussian laser pulse.

The calculated dependence of the maximum the degrees of alignment ( $\langle \cos^2(\theta) \rangle_{\text{max}}$ ) (a) and orientation ( $|\langle \cos(\theta) \rangle|_{\text{max}}$ ) (b) (outside the laser pulse) on the pulse duration  $\tau$ , depicted in Fig.1 for different temperatures, shows the clear periodic structures in the adiabatic regime.

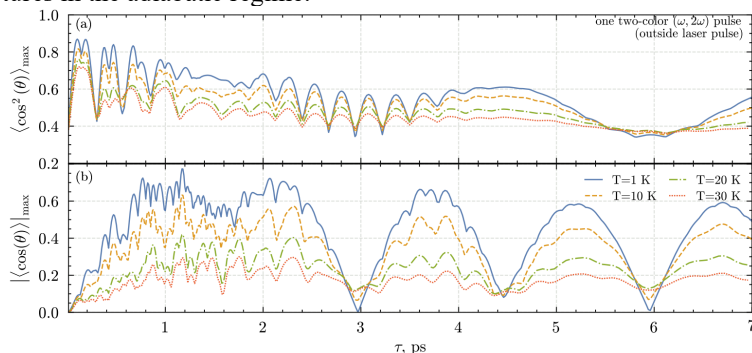


Fig. 1. The dependence of the maximum the degrees of alignment ( $\langle \cos^2(\theta) \rangle_{\text{max}}$ ) (a) and orientation ( $|\langle \cos(\theta) \rangle|_{\text{max}}$ ) (b) on the trapezoidal laser pulse duration  $\tau$ . The different temperatures  $T = 1, 10, 20, 30$  K are indicated by a solid, dashed, dash-dotted and dotted lines respectively.

It is shown that the use of additional prepulse increases the maximum degree of orientation, and the application of two-color rather than monochromatic prepulse leads to a higher maximum degree of orientation. The influence of change of relative phase between fundamental and second harmonics on orientation of molecules in the case of one and two impulses was also studied.

### Список литературы

1. Koval E. A., Field-free alignment and orientation of linear molecules by two-color trapezoidal laser pulses // arXiv:2312.11777 (submitted to Phys. Rev. A), P.1-9.

А.А. ЛИСКОВИЧ

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЛАЗЕРНО-ЭМИССИОННОЙ ПЛАЗМЫ

Приведены результаты исследования влияния отклонения положения исследуемого объекта относительно фокуса оптической системы фокусирующей лазерное излучение на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Определены величины допустимых отклонений, при которых интенсивности спектральных линий сохраняют свое значение.

A. A. LISKOVICH

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

## INFLUENCE OF THE POSITION OF THE OBJECT STUDIED ON THE INTENSITY SPECTRAL LINES OF LASER EMISSION PLASMA

The results of a study of the influence of the deviation of the position of the object under study relative to the focus of the optical system focusing laser radiation on the intensity of the spectral lines of the laser emission plasma are presented. The values of permissible deviations at which the intensities of spectral lines retain their values have been determined.

Лазерно-эмиссионная спектроскопия (LIBS) является одним из перспективных методов неразрушающего экспрессного контроля элементного состава вещества [1–2]. Состав вещества определяется на основе интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, образованной лазерным излучением на его поверхности. Интенсивность спектральных линий зависит от стабильности энергии лазерного излучения, точности расположения исследуемого объекта относительно фокуса оптической системы фокусирующей лазерное излучение, его температуры [3–4]. Энергию лазерного излучения и температуру можно стабилизировать. Точность расположения исследуемого объекта связана с действиями оператора и сильно зависит от субъективных факторов. В этой связи актуальным является определение величин допустимых отклонений, при которых интенсивности спектральных линий сохраняют свое значение и не влияют на точность LIBS анализа. Экспериментальная установка описана в [5–6].

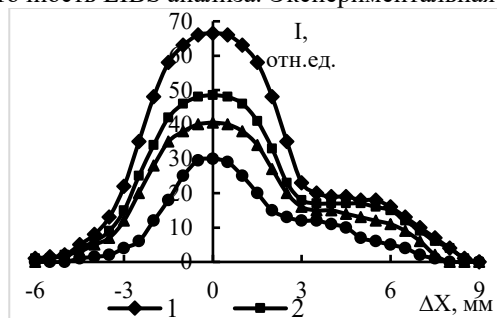


Рис. 1

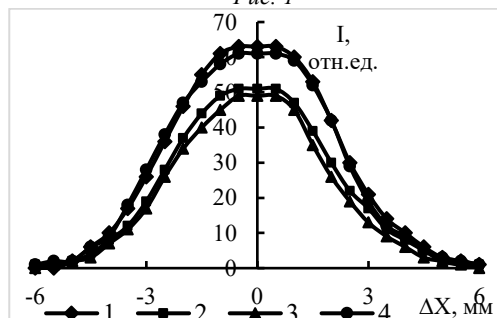


Рис. 2

Зависимости интенсивности спектральной линии Si I 288,158 нм от положения образца кварцевого стекла относительно фокуса фокусирующей системы ( $\Delta X$ ) при работе лазера в режиме сдвоенных импульсов приведены на рис. 1. Было принято, что  $\Delta X$  положительное, если фокус фокусирующей системы расположен перед исследуемым объектом, а  $\Delta X$  отрицательное – когда он находился внутри объекта. Межимпульсный интервал составлял 1 мкс (кр. 1), 20 мкс (кр. 2), 50 мкс (кр. 3) и 100 мкс (кр. 4). Суммарная энергия лазерных импульсов составляла 36 мДж.

Зависимости интенсивности спектральных линий Cu I 324,754 нм (кр. 1), Cu I 327,396 нм (кр. 2), Zn I 330,259 нм (кр. 3) и Zn I 334,502 нм (кр. 4) латуни от  $\Delta X$  представлены на рис. 2. Межимпульсный интервал составлял 1 мкс. Суммарная энергия лазерных импульсов составляла 22 мДж. Из представленных зависимостей следует, что с удалением исследуемого объекта от фокуса, интенсивности спектральных линий снижаются. В диапазоне  $\Delta X \sim \pm 0,5$  мм интенсивности спектральных линий практически не изменяются.

Таким образом, диапазоном допустимых отклонений положения исследуемых объектов относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы, при проведении LIBS анализа, при которых интенсивности спектральных линий остаются неизменными и их значения могут использоваться при проведении количественного LIBS анализа, можно считать  $\pm 0,5$  мм.

### Список литературы

1. Попов А.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б. // Вестник МГУ. Серия 2. Химия. 2009. Т. 50, № 6. С. 453–467.
2. Tognoni E., Cristoforetti G. // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2014. Vol. 29, No. 8. P. 1318–1338.
3. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, №2. С.285–292.
4. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. фіз.. інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2021. Т. 11, № 1. С. 94–106.
5. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И. и другие // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
6. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2, Мат.. фіз.. інфарм., выліч. тэхн. і кір.. 2020. Т. 10, № 2. С. 103–115.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАНИЕМ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

В статье показано, что распределение микротвердости в поперечном сечении композиционного покрытия, полученного комбинированием лазерной наплавки и плазменного напыления, имеет периодически равномерный характер.

M.A. KARDAPOLOVA, N.I. LUTSKO, L.I. PILETSKAIA  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## MICROHARDNESS DISTRIBUTION IN COATING PRODUCED BY A COMBINATION OF PLASMA SPRAYING AND LASER CLADDING

The article shows that the distribution of microhardness in the cross section of a composite coating obtained by combining laser cladding and plasma spraying is periodically uniform.

Композиционные покрытия нашли широкое применение для защиты поверхностей деталей от коррозии и различных видов изнашивания. В том числе, достаточно хорошо исследовано получение композиционных покрытий из разнородных материалов методом лазерной наплавки, когда на основу наносятся чередующиеся валики из никелевого сплава и бронзы [1]. Авторами статьи производилось нанесение композиционного покрытия сочетанием методов лазерной наплавки и плазменного напыления, когда на основу методом лазерной наплавки наносились параллельные валики из никелевого сплава с определенным зазором, а затем промежутки между валиками из никелевого сплава заполнялись бронзой методом плазменного напыления.

Наплавка валиков из никелевого сплава ПГ-12Н-01 осуществлялась с применением непрерывного СО<sub>2</sub> лазера «Комета 2» мощностью 1000 Вт и коаксиальной наплавочной головки. Плазменное напыление бронзы ПГ-19М-01 производилось на установке плазменного напыления УПУ-3Д. Покрытия наносили на образцы из стали 45.

Производилось исследование микротвердости в поперечном сечении композиционного покрытия в направлении параллельно основе как в наплавленных валиках из никелевого сплава, так и в плазменном покрытии из бронзы, нанесенном в промежутках между ними. Исследования выполнялись с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 100 г с шагом 0,1 мм. Результаты исследования микротвердости в валиках из никелевого сплава показаны на рис. 1, результаты для промежутков, заполненных покрытием из бронзы, показаны на рис. 2.



Рис. 1. Распределение микротвердости в наплавленных валиках из сплава ПГ-12Н-01



Рис. 2. Распределение микротвердости в участках плазменного покрытия из бронзы ПГ-19М-01

Из рис. 1 видно, что в пределах валиков из никелевого сплава, наплавленных при разных дистанциях наплавки микротвердость по ширине валиков распределена достаточно равномерно и находится для разных режимов наплавки в пределах 5000-8500 МПа. На рис. 2 также видно, что и в участках покрытия из бронзы присутствует равномерное распределение микротвердости, при разных скоростях перемещения плазматрона микротвердость участков плазменного покрытия находится в пределах 1000-2500 МПа.

Таким образом, по ширине поперечного сечения исследуемого покрытия наблюдается периодичность изменения микротвердости от высоких значений, присущих наплавленному никелевому сплаву до низких значений, соответствующих участкам плазменного покрытия из бронзы.

### Список литературы

1. О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, Н.И. Луцко, О.Н. Кавальчук. – Формирование однослойных композиционных полосчатых покрытий из сплава ПГ-12Н-01 и бронзы ПГ-19М-01, получаемых лазерной наплавкой. – Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки/ редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2013. – 616 с. - С. 177-184.

Е.Ю. МАЛАЩЕНКО, М.В. НИКАДОН, К.П. ФИЛИПКОВА, М.П. ПАТАПОВИЧ  
*УО «Белорусская государственная академия связи», Минск, Республика Беларусь*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВЫСОХШЕЙ КАПЛИ ПЛАЗМЫ КРОВИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Проведено изучение зависимости интенсивности спектральных линий элементов по диаметру капли плазмы крови, высушенной на плоской поверхности оргстекла. Данные эксперименты выполнялись с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Представлен краткий анализ полученных результатов.

A.Y. MALASHCHANKA, M.V. NIKADON, K.P. FILIPKOVA, M.P. PATAPOVICH  
*Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus*

## STUDY OF THE ELEMENTAL COMPOSITION OF A DRIED DROPLET OF BLOOD PLASMA USING DUAL LASER PULSES

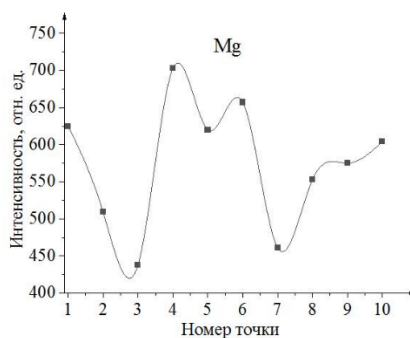
The dependence of the intensity of spectral lines of elements along the diameter of a drop of blood plasma dried on a flat plexiglass surface was studied. These experiments were performed using a laser double-pulse atomic emission multichannel spectrometer LSS-1. A brief analysis of the results obtained is presented.

В современных научных медицинских исследованиях значительное внимание уделяется вопросам диагностики, что впоследствии облегчает постановку окончательного диагноза. Для этих целей часто имеет смысл изучение состава биологических жидкостей, что возможно с применением спектральных методов, особенно при воздействии на объект лазерных импульсов. Одним из достоинств лазерного излучения при испарении материала является малая глубина проникновения, что позволяет испарять мишени при относительно малых затратах энергии. Процессы, которые связаны с образованием приповерхностной лазерной плазмы многофакторны, следовательно, получить простых закономерностей для их описания не удастся, однако повысить чувствительность спектрального анализа на несколько порядков возможно, используя сдвоенные лазерные импульсы [1].

Для проведения оценки локального пространственного распределения химических элементов в высохших на твердой поверхности каплях плазмы крови был применен лазерный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1, в котором лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора. Все эксперименты проводились в атмосфере воздуха при нормальном атмосферном давлении. С целью выбора оптимальных условий проведения эксперимента были зарегистрированы спектры при различных рабочих параметрах и оценено их влияние на интенсивность спектральных линий элементов. На рис. 1, в качестве примера, представлен снимок высохшей капли плазмы крови человека на поверхности оргстекла (а), а также зависимость интенсивности линии магния от номера точки по диаметру данного биообразца (б) при энергии для первого из импульсов излучения 58 мДж и 42 мДж для второго. Временной интервал между сдвоенными импульсами составлял 8 мкс.



а)



б)

Рис. 1. Снимок капли плазмы крови (а) и зависимость интенсивности линии магния от номера точки (б)

Полученные результаты отражают факт изменением формы капли при ее испарении, что зависит от содержания в ней соли. Кроме того, наблюдается определенная закономерность между интенсивностью линии магния и положением точки. Следовательно, проведенные исследования могут стать преддверием разработки методик количественного анализа.

### Список литературы

1. М.П. Патапович, Ж.И. Булойчик // Вестн. Бел. гос. ун-та. 2009. Сер. 1. № 3. С. 14–17.

А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Е.В. УЛТУРГАШЕВА, И.М. ПОДЛЕСНЫХ, Н.Г. СЦЕПУРО, М.С. КОВАЛЕВ, С.И. КУДРЯШОВ

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*

## НАНОСЕКУНДНАЯ ФАБРИКАЦИЯ СВЕРХЛЕГИРОВАННОГО СЕРОЙ КРЕМНИЯ

Рассмотрено одновременное структурирование и легирование серой поверхности кремния лазерным излучением наносекундной длительности в присутствии газа SF<sub>6</sub>. Полученные конусообразные структуры демонстрируют увеличение поглощения в ближнем и среднем ИК-диапазонах.

A.A. NASTULYAVICHUS, E.V. ULTURGASHEVA, I.M. PODLESNYH, N.G. STSEPURO, M.S. KOVALEV, S.I. KUDRYASHOV

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

## NANOSECOND FABRICATION OF SUPERDOPPED SILICON

The simultaneous structuring and doping by sulfur of silicon surface by nanosecond laser radiation in the presence of SF<sub>6</sub> gas is considered. The resulting cone-shaped structures show an increase in absorption in the near and mid-IR ranges.

Кремний широко используется в микро- и оптоэлектронике. Большое количество экспериментальных исследований посвящены сверхлегированию поверхности кремния донорными атомами халькогенидов (в первую очередь – серы) с помощью фемтосекундной лазерной обработки [1-2].

Целью данной работы являлось повышение ИК поглощения кремния посредством его одновременного структурирования и легирования в присутствии газа SF<sub>6</sub>. Под действием многоимпульсного ( $\approx 100$  импульсов в точку) лазерного излучения с длиной волны 532 нм и длительность импульса 10 нс на поверхности кремния были сформированы конусообразные структуры. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) охарактеризована топография лазерно-структурированной поверхности (Рисунок 1). Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ (ЭДРС) показал присутствие  $\approx 1$  ат. % легирующей донорной примеси серы в поверхностном слое.

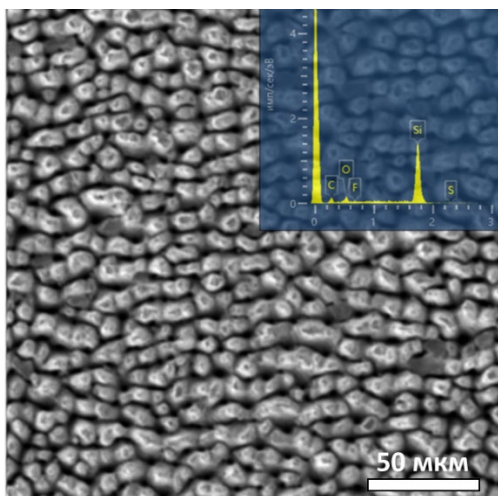


Рис. 1. СЭМ-изображение структурированной области; вставка: ЭДРС спектр

Для структурированной области характерно снижение ИК пропускания и отражения на 20-40% по сравнению с необработанным кремнием.

Результаты получены в рамках выполнения госзадания №FSFN-2024-0019

### Список литературы

1. Kudryashov S. I., Nguyen L. V., Kirilenko D. A. and others // ACS Applied Nano Materials. 2018. 1(6), 2461-2468
2. Crouch C. H., Carey J. E., Shen M., Mazur E. and others // Applied Physics A. 2004. V. 79. -№ 7. P. 1635-1641.

А.А. УШАКОВ<sup>1</sup>, К.А. МАМАЕВА<sup>1</sup>, С.А. РОМАНОВ<sup>1,2</sup>, Т.В. ДОЛМАТОВ<sup>1</sup>, П.А. ЧИЖОВ<sup>1</sup>,  
В.М. ШЕВЛЮГА<sup>1</sup>, В.В. БУКИН<sup>1</sup>, С.В. ГАРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

## ГЕНЕРАЦИЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ СВЕРХСВЕТОВОЙ РАЗРЯДКЕ ПЛОСКОГО ВАКУУМНОГО ФОТОДИОДА

Приведены результаты по измерениям энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) в ТГц диапазоне при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами при различных значениях доли эмитируемых зарядов с поверхности катода и различных значениях напряжения, подаваемого между обкладками фотодиода.

A.A. USHAKOV<sup>1</sup>, K.A. MAMAIEVA<sup>1</sup>, S.A. ROMANOV<sup>1,2</sup>, T.V. DOLMATOV<sup>1</sup>, P.A. CHIZHOV<sup>1</sup>,  
V.M. SHEVLYUGA<sup>1</sup>, V.V. BUKIN<sup>1</sup>, S.V. GARNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>National research nuclear university MEPhI (Moscow engineering physics institute)

## GENERATION OF TERAHERTZ RADIATION AT SUPERLUMINAL DISCHARGE OF A FLAT VACUUM PHOTODIODE

The results of measurements of electromagnetic radiation (EMR) energy in the THz range during superluminal discharge of a vacuum photodiode by femtosecond laser pulses at different values of the fraction of emitted charges from the cathode surface and different values of the voltage applied between the photodiode liners are presented.

ТГц излучение нашло огромное применение как в экспериментальных, так и в теоретических задачах. Ранее было показано, что при наклонном падении рентгеновского излучения на поверхность мишени образуется электронная эмиссия, формирующая ЭМИ [1]. В работах [2-3] предложена методика по усилению излучения при помощи внешнего поля, прикладывая которое энергия имитируемых с поверхности катода электронов резко возрастает, вследствие чего энергия ЭМИ увеличивается. Подобный метод продемонстрировал эффективную генерацию в СВЧ диапазоне. Уменьшение времени торможения электронов позволяет генерировать импульсы в более высокочастотной области, в том числе и ТГц. Таким образом, меняя конфигурацию фотодиода: расстояние между обкладками, величину внешнего поля, можно получить ЭМИ в ТГц диапазоне.

Целью работы является исследование способов генерации ТГц излучения при сверхсветовой разрядке вакуумного фотодиода фемтосекундными лазерными импульсами.

В роли источника ТГц излучения используется плоский вакуумный фотодиод, конструкция которого представляет собой анод, изготовленный из пластинки нержавеющей стали и, разделенный от него слоем диэлектрического изолятора, катод, представляющий собой сурьмяно-цезиевое покрытие ( $Cs_3Sb$ ), нанесенное на поверхность входного окна, изготовленного из сапфира. Для формирования электронной эмиссии под углом на фотокатод направляется фемтосекундное лазерное излучение (вторая гармоника титан-сапфирового лазера, центральная длина волны 400 нм, длительность импульсов до 50 фс, энергии импульсов до 1 мДж). Под действием лазерного излучения возникает электронная эмиссия, которая при воздействии внешнего электрического поля (50 – 100 кВ/см) ускоряется и тормозит в тонком слое нержавеющей анода. Регистрация излучения производится с помощью детектора Голея с использованием методики синхронного детектирования (рис.2).

В работе проводится исследование зависимости импульсов ТГц излучения от напряженности прикатодного поля и доли эмитируемого заряда с поверхности.

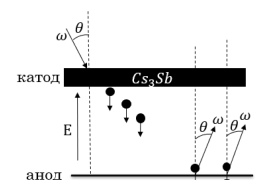


Рис. 1. Схема фотодиода

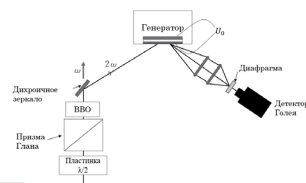


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

### Список литературы

1. Carron N.J., Longmire C.L. // Transactions on Nuclear Science. 1976 V.23 (6). P.1897-1902.
2. Лазарев Ю.Н., Петров П.В. // Письма в ЖЭТФ. 1994 V.60 (9). P.625-628.
3. Brendel V. M., Bukin V. V., Garnov S. V. // Physics of Wave Phenomena. 2014 V.22 (4). P.219-222.

## ОСОБЕННОСТИ ПРЯМОЙ ЛАЗЕРНОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМОНИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

Проведено исследование влияния параметров наносекундного с длиной волны  $\lambda=1,064$  мкм и  $\lambda=0,355$  мкм, а также фемтосекундного с длиной волны  $\lambda=1,030$  мкм импульсного лазерного излучения на качество металлизированной поверхности и степень металлизации керамики AlN для формирования проводящего слоя с наименьшим сопротивлением. Проанализированы зависимости сопротивления и шероховатости поверхности полученных структур от плотности энергии, длительности и перекрытия импульсов наносекундного излучения инфракрасного диапазона. Проведено сравнение характеристик проводящего слоя при прямой металлизации лазерным излучением с разной длительностью импульсов и длиной волны. Эксперименты проводились в воздушной среде.

A.A. SVIRIDOVA, A.S. SHCHEKIN, V. N. PETROVSKIJ, A.A. IVANOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FEATURES OF DIRECT LASER METALLIZATION OF ALUMONITRIDE CERAMICS

The study examined the effects of nanosecond (with a wavelength of  $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$  and  $\lambda = 0.355 \mu\text{m}$ ) and femtosecond (with a wavelength of  $\lambda = 1.030 \mu\text{m}$ ) pulse laser radiation parameters on the quality of the metallized surface and the degree of metallization of AlN ceramics in order to form the lowest resistance conductive layer. The dependences of the resistance and surface roughness of the obtained structures on the laser fluence, duration, and overlap of pulses of nanosecond infrared radiation are analyzed. The characteristics of the conductive layer during direct metallization by laser radiation with different pulse durations and wavelengths are compared. The experiments were carried out in the air.

Металлизированные подложки из алюмонитридной керамики (AlN) являются незаменимым материалом для производства современных микроэлектронных изделий. Для металлизации диэлектрических керамических материалов обычно применяют методы вакуумного напыления, вжигания проводящих паст и химико-электролитической металлизации, которые являются многоступенчатыми процессами и требуют затрат большого количества ресурсов. Лазерная обработка – эффективный способ модификации поверхности материала и металлизации AlN с высокой точностью и управляемостью процесса. Управление параметрами лазерного излучения позволяет контролировать качество металлизированной поверхности и степень металлизации, что способствует упрощению производства продуктов микроэлектроники меньших размеров и более сложной геометрии, а также эффективному использованию других методов металлизации для получения составного слоя с меньшим значением сопротивления. Метод прямой лазерной металлизации связан с протеканием реакции разложения нитрида алюминия при термическом воздействии излучения:  $\text{AlN(тв)} + h\nu \rightarrow \text{Al(тв)} + \text{N(г)}$ [1;2].

Поглощение AlN длин волн  $\lambda=1$  мкм в основном определяется ИК-поглощением глубокими уровнями, возникающими из-за наличия дефектов в решетке[3]. Некоторые длины волн УФ диапазона поглощаются керамикой AlN в значительно большей степени, что связано с механизмом собственного поглощения AlN при превышении энергии фотона ширины запрещенной зоны 6,2 эВ, а также с дефектами в решетке. Для получения проводящего слоя с минимальным сопротивлением, необходимо проанализировать результаты процесса металлизации при использовании импульсного лазерного излучения с разной длительностью импульсов и длиной волны.

Целью работы было формирование проводящего слоя на поверхности керамической подложки AlN с минимальным сопротивлением при лазерной обработке наносекундным с длиной волны  $\lambda=1,064$  мкм и  $\lambda=0,355$  мкм, а также фемтосекундным с длиной волны  $\lambda=1,030$  мкм импульсным лазерным излучением с контролем качества поверхности и степени металлизации.

В работе было показано, что сопротивление металлизированного слоя обратно пропорционально квадратному корню из длительности импульса, определено наличие оптимальных значений перекрытия лазерных импульсов по направлению сканирования равного 50% и направлению шага равных 96% и 99,7% для длительностей импульсов 200 и 4 нс ИК излучения соответственно. При использовании оптимальных перекрытий импульсов с наибольшей плотностью энергии был получен проводящий слой с минимальным сопротивлением и максимальной производительностью процесса. В рамках работы было проведено сравнение результатов металлизации при использовании УФ и ИК наносекундного излучения и показана неэффективность металлизации фемтосекундным излучением, что объясняется препятствующим механизмом холодной абляции и малой толщиной образованного металлизированного слоя.

### Список литературы

1. Koziol P. E., Antończak A. J., Szymczyk P. and others // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 287. P. 165–171.
2. Yang Q., Yang C., Lv Z. and others // J. Mater. Sci. 2019. Vol. 54, №. 22. P. 13874-13882
- Mokhov E.N., Rabchinskiy M.K., Nagalyuk S.S. and others // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 224–227.

Д.С. СТЕПАНЮК, М.А. ЗАЙКИНА, Е.А. ЕЛТЫШЕВА, Д.А. СИНЕВ

*Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АКЦЕПТОРНОЙ ПОДЛОЖКИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОПРОВОДЯЩИХ СТРУКТУР, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ГЛУБОКИХ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЕЙ**

Проведены исследования по выявлению степени влияния физико-химических свойств донорного слоя, образованного при предварительном структурировании поверхности акцепторной подложки методом лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП), на электрические характеристики токопроводящих структур, полученных при осаждении меди из глубоких эвтектических растворителей под лазерным воздействием волоконного лазера с длиной волны 1070 нм. Сформулированы рекомендации к выбору режимов структурирования акцепторной подложки и типу поглощающей мишени, используемой при реализации метода ЛИМП, для достижения заданных электрических характеристик.

D.S. STEPANYUK, M.A. ZAIKINA, E.A. ELTYSHEVA, D.A. SINEV

*National Research University ITMO, St. Petersburg, Russia*

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF AN ACCEPTOR SUBSTANCE ON THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF CURRENT-CONDUCTING STRUCTURES DEPOSITED FROM DEEP EUTECTIC SOLVENTS**

Studies have been carried out to identify the degree of influence of the physicochemical properties of the donor layer formed during the preliminary structuring of the surface of the acceptor substrate using the laser-induced microplasma (LIMP) method on the electrical characteristics of current-conducting structures obtained by deposition of copper from deep eutectic solvents under laser irradiation fiber laser with a wavelength of 1070 nm. Recommendations were also formulated for the selection of structuring modes for the acceptor substrate and the type of absorbing target used in the implementation of LIMP technology to achieve the specified electrical characteristics.

В настоящее время активное развитие наблюдается в области гибридной электроники, а основной задачей является изготовление частого периодического прототипирования новых конфигураций. Существует множество методов изготовления типовых элементов электроники (платы, сенсоры и т.д.) таких как: струйная печать проводящими чернилами [1], лазерно-индуцированный перенос [2], лазерно-индуцированное осаждение из газовой фазы [3]. Однако, из-за многостадийности процесса изготовления, дороговизны оборудования и материалов использование перечисленных технологий не позволяет в полной мере выполнить задачу формирования структур сложной геометрии. Метод лазерно-индуцированного осаждения металлов из глубоких эвтектических растворителей является современным решением, применение которого позволяет быстро и просто изготавливать токопроводящие структуры сложной геометрии на поверхности акцепторных подложек [4]. Перед осаждением токопроводящих структур на поверхность акцепторной подложки для повышения электрических характеристик было предложено проводить предварительное структурирование поверхности стекла с применением технологии лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП) [5].

Настоящий доклад посвящен изучению влияния физико-химических свойств донорного слоя, образованного на поверхности акцепторной подложки при структурировании технологией ЛИМП, на величину удельной электрической проводимости структур, полученных при осаждении меди из глубоких эвтектических растворителей под действием излучения волоконного лазера с длиной волны 1070 нм. Изменение мощности лазерного излучения и количества проходов приводит к образованию донорного слоя различной толщины вследствие воздействия плазменного факела, образованного при поглощении лазерного излучения мишенью. Ряд характеристик лазерного излучения был выбран по результатам предыдущих исследований [6], и в настоящем исследовании их значения оставались неизменными: скорость сканирования лазерного излучения 500 мм/с, частота следования импульсов 20 кГц, длительность импульса 50 нс. В качестве поглощающих мишеней для технологии ЛИМП были использованы титановая пластина, стальная пластина и пластина графита, обладающие различными значениями поглощательных способностей (в диапазоне от 0,3 до 0,99) и электрической проводимости (в диапазоне от  $0,13 \cdot 10^6$  до  $2,38 \cdot 10^6$  См/м), а также приводят к возникновению плазменного факела с различными характеристиками.

Коллектив авторов благодарит к.х.н. доц. И. И. Тумкина, Е. М. Хайруллину и Е. А. Авилову за ценные обсуждения. Коллектив авторов благодарит факультет Систем управления и робототехники Университета ИТМО за помощь при работе с контактным профилометром Hommel Tester T8000.

### *Список литературы*

1. Super-fine ink-jet printing: toward the minimal manufacturing system. / Murata, K., Matsumoto, J., Tezuka, A. et al. // *Microsystem Technologies*. – 2005. – vol. 12, № 1-2. – P. 2–7.
2. Lasersonic® LIFT Process for Large Area Digital Printing / G. Hennig, T. Baldermann, C. Nussbaum [et al.] // *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. – 2012. – Vol. 7. – №. 3.
3. Liu, Y.S. Laser direct writing of tungsten lines for VLSI applications / Liu, Y.S. // *United States: Materials Research Society*. – 1986.
4. Levchakova A. S. et al. Highly rapid direct laser fabrication of Ni micropatterns for enzyme-free sensing applications using deep eutectic solvent // *Materials Letters*. – 2022. – Т. 308. – №. 131085.
5. Avilova E.A. et al. Direct Laser Writing of Copper Micropatterns from Deep Eutectic Solvents Using Pulsed near-IR Radiation // *MDPI Nanomaterials*. – 2022. – Т. 12. – №. 1127.



Е.В. УЛТУРГАШЕВА<sup>1</sup>, А.А. НАСТУЛЯВИЧУС<sup>1</sup>, Э.Р. ТОЛОРДАВА<sup>1,2</sup>, С.И. КУДРЯШОВ<sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ФИАН, Москва, Россия

Федеральное государственное бюджетное учреждение «НИЦЭМ им. Н. Ф. Гамалеи», Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНОГО МЕТОДА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОГО ПРЯМОГО ПЕРЕНОСА НАНОЧАСТИЦ МЕДИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РОСТА БАКТЕРИЙ

Рассмотрен метод лазерно-индуцированного прямого переноса (ЛИПП) для уничтожения бактерий с использованием тонкой медной пленки (от 120 нм до 5 нм). Для этого был подобран оптимальный режим переноса донорного материала и была проведена оценка антибактериальной активности посредством микробиологических высевов.

E.V. ULTURGASHEVA<sup>1</sup>, A.A. NASTULYAVICHUS<sup>1</sup>, E.R. TOLORDAVA<sup>1,2</sup>, S.I. KUDRYASHOV<sup>1</sup>

Federal State Budgetary Institution of Science LPI (Lebedev Physical Institute), Moscow, Russia

N. F. Gamaleya Federal Research Center for Epidemiology & Microbiology, Moscow, Russia

## APPLICATION OF THE ADDITIVE METHOD OF LASER-INDUCED FORWARD TRANSFER OF COPPER NANOPARTICLES TO SUPPRESS THE GROWTH OF BACTERIA

The laser-induced forward transfer (LIFT) method for killing bacteria using a thin copper film (from 120 nm to 5 nm) is considered. For this purpose, the optimal mode of transfer of donor material was selected and the antibacterial activity was assessed using microbiological inoculations.

Метод лазерно-индуцированного прямого переноса представляет собой технологию аддитивного производства, основанную на использовании лазерного излучения для переноса материала от донорной подложки к акцепторной без промежуточных стадий, как инновационный и перспективный подход в различных областях науки [1], в том числе и для применения в биомедицине. В данной работе использовался метод ЛИПП для нанесения антибактериальных частиц меди на бактериальные биопленки. Суть метода состоит в том, что лазерный луч фокусируется на границе раздела подложка-металлический слой; когда материал нагревается выше температуры кипения, результирующее давление пара на границе “выбрасывает” донорный материал в сторону акцепторной подложки.

В качестве донорной подложки использовались тонкие пленки меди на полиэтилентерефталате (ПЭТ), а в качестве акцепторных подложек использовались бактериальные биопленки на стекле и свиная кожа с нанесенной на нее планктонной культурой *Salmonella spp.* Схема эксперимента приведена на рисунке 1, где оптимальный режим переноса соответствует энергии 0.3 мДж, скорости сканирования 2000 мм/с и расстоянию между донорной и акцепторной подложкой 2 мм. Лазерный луч фокусировался объективом (фокусное расстояние 163 мм) в фокальное пятно шириной 40 мкм.

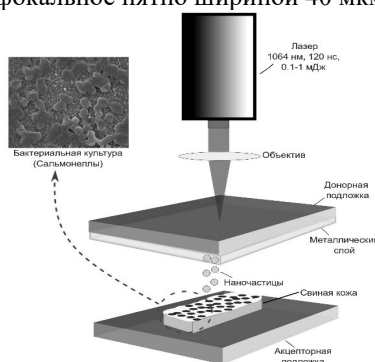


Рис. 1. Экспериментальная схема метода ЛИПП

Было исследовано влияние толщины пленки на антибактериальные свойства. Оценка антибактериальной активности посредством микробиологических высевов (подсчет колониеобразующих единиц (КОЕ)) показала, что при использовании донорной пленки меди толщиной 120 нм происходит полное уничтожение бактерий на поверхности свиной кожи. Контроль составил:  $7 \times 10^5$  КОЕ/мл, с частицами меди: 0.

**Благодарность:** работа поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2023-603).

### Список литературы

1. Nastulyavichus A., Kudryashov S., Shelygina S., Ulturgasheva E. // *Laser Phys. Lett.* 2024. Vol. 21, № 035603. P. 1-5.

А.В. УЛЬЯНОВ, А.В. РУДЫЙ, Е.И. МАВРЕШКО, Е.А. ЧЕШЕВ  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ КЕРАМИКИ НА АЛЮМО-ИТТРИЕВОМ ГРАНАТЕ, ЛЕГИРОВАННОМ ИОНАМИ НЕОДИМА

В ходе исследования на Государственном лазерном полигоне «Радуга» была оценена лазерная керамика Nd<sup>3+</sup>:YAG, использующая продольную схему накачки для оптимального резонанса. При использовании лазерного диода FocusLight образцы отечественной лазерной керамики сравнивали с эталоном Konoshima Chemical Co. Ltd.. Остаточная концентрация пор в керамическом образце была ниже, чем в эталоне Konoshima Chemical Co. Ltd., что указывает на благоприятное качество.

Y.V. ULYANOV, A.V. RUDIY, E.I. MAVRESHKO, E.A. CHESHEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF DOMESTIC CERAMICS ON ALUMINUM- YTTTRIUM GARNET DOPED WITH NEODYMIUM IONS

A study at the State Laser Polygon “Raduga” evaluated Nd<sup>3+</sup>:YAG laser ceramics using a longitudinal pumping pattern for optimal resonance. Using the FocusLight laser diode, samples of domestic laser ceramics were compared with the Konoshima Chemical Co. standard. Ltd. The residual pore concentration in the ceramic sample was lower than that of the Konoshima Chemical Co. reference. Ltd., which indicates favorable quality.

При исследовании Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазерной керамики Государственного лазерного полигона «Радуга» использовалась продольная схема накачки, оптимизирующая резонанс с пучком диодной накачки в полуконфокальной конфигурации резонатора. Лазерный диод FocusLight (808 нм, мощность до 10 Вт) поддерживал контролируемую температуру поглощения ионов Nd при длине волны 808,5 нм. Режим QCW снижает тепловые эффекты, а мощность излучения накачки измеряется калориметрическим измерителем мощности лазерного излучения Gentec. Эффективность генерации, определенная по соотношению выходной мощности к поглощенной мощности накачки, показала, что керамический образец 1 (ФКП «ГЛП Радуга») соответствовал керамике Nd<sup>3+</sup>:YAG от Konoshima Chemical Co. Ltd., тогда как образец 2 имел пониженную эффективность, что связано с плохой накачкой (рис. 1). Согласование луча с диаметром основной моды. Измерения порога генерации были проведены для всех предоставленных образцов активных элементов.

С точки зрения качества лазерной керамики, оценивая потери из-за рассеяния на остаточных порах, можно утверждать, что концентрация остаточных пор в керамике активного элемента 1 ниже, чем в эталонном образце от Konoshima Chemical Co. Ltd. На элементы 2 и 3 повлияли ошибки проектирования, о чем свидетельствуют измеренные пороговые значения их генерации. Этот вывод согласуется с оперативными проблемами, наблюдаемыми в этих элементах.

В заключение в исследовании подчеркивается важность схем продольной накачки для оптимального резонанса и влияние конструктивных соображений на эффективность генерации и пороговые измерения. Он подчеркивает конкурентоспособность керамического образца 1 по сравнению с установленным эталоном и определяет области для улучшения образцов 2 и 3, способствуя всестороннему пониманию лазерной керамики, производимой Государственным лазерным полигоном «Радуга».

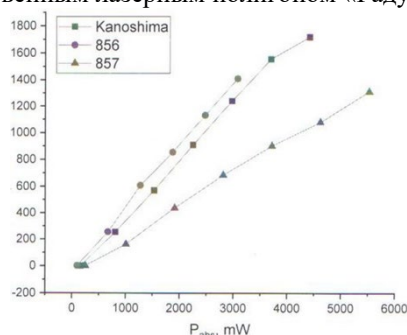


Рис. 1. Измеренные зависимости мощности излучения лазеров с исследуемыми образцами активных элементов от величины, поглощённой в активном элементе мощности накачки

### Список литературы

1. Bezotosnyi V.V., Balashov V.V., Bulaev V.D. and others // Quantum Electronics. 2018. V.48 (9). P.802–806.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКРОЭЛЕМЕНТОВ ПО ДИАМЕТРУ КАПЛИ БИООБРАЗЦОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

С помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1 была изучена зависимость интенсивности линий химических элементов по диаметру в высушенных на пористой поверхности каплях цельной крови человека. Представлено краткое обсуждение результатов.

A.V. SHCHUKO, N.H. TRINH, M.P. PATAPOVICH  
Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus

## STUDING THE SPATIAL DISTRIBUTION OF MACROELEMENTS ACCORDING THE DIAMETER OF A BIOSAMPLE DROPLET BY LASER SPECTRAL ANALYSIS METHOD

Using a laser double-pulse atomic emission multichannel spectrometer LSS-1, the dependence of the intensity of lines of chemical elements along the diameter in drops of whole human blood dried on a porous surface was studied. A brief discussion of the results is presented.

Анализ биологических объектов является одной из основных областей применения инструментальных, в том числе и спектральных методов исследования. В частности, изучение агрегатного состояния компонентов биологических жидкостей в норме и при патологии чрезвычайно важно как для фундаментальной науки, так и ее практического приложения. Следовательно, процессы, протекающие на поверхности и в объеме высыхающей капли крови при воздействии на образец сдвоенными лазерными импульсами представляют научный интерес [1].

Для изучения зависимости интенсивности спектральных линий химических элементов от положения точки на поверхности биообъекта использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1, изготовленный СП «ЛОТИС ТИИ». В качестве источника возбуждения плазмы здесь выступает двухимпульсный неодимовый лазер с возможностью регулирования временного интервала между импульсами [2]. При проведении данного исследования энергия импульсов находилась в диапазоне от 20 до 60 мДж, временная задержка между импульсами равнялась 8 мкс. Анализировались результаты воздействия лазерных импульсов на поверхность капли цельной крови, высохшей на пористой поверхности бумажного фильтра от положения точки. В качестве примера, на рис. 1, приведен внешний вид исследуемого образца (а) и зависимость интенсивности линии кальция от номера точки, причем анализ проводился по диаметру биообразца (б).

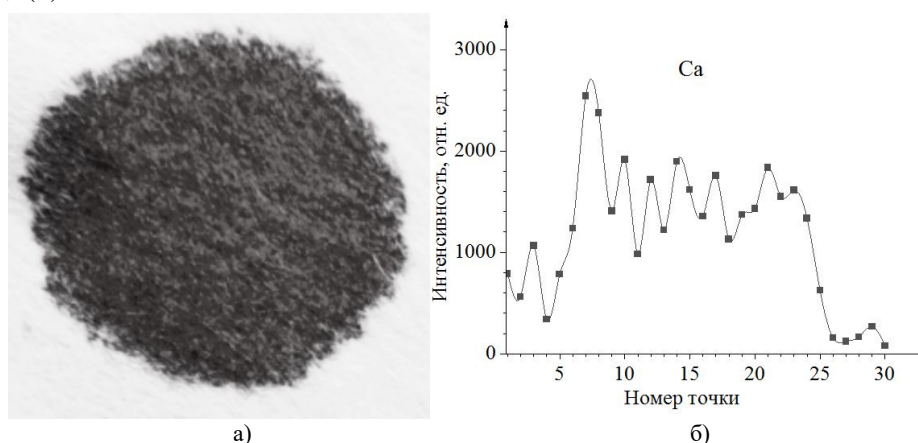


Рис. 1. Внешний вид высохшей капли крови (а) и зависимость интенсивности линии кальция от номера точки (б)  
Наблюдается определенная закономерность между интенсивностью линий анализируемых элементов и положением точки, в частности, отмечается преимущественное распределение кальция по центру капли.  
Таким образом, возбуждение сдвоенными лазерными импульсами анализируемой поверхности высохшей капли крови может быть со временем использовано для поиска маркеров заболеваний.

### Список литературы

1. К.Ф. Ермалицкая // Вестн. Ужгород. ун-та. 2011. Серия Физика. Вып. 30. С. 296–301.
2. Чинь Н. Х., И.Д. Пашковская, Ж.И. Булойчик, А.П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. 2012. Сер. 1. № 1. С. 31–34.

М.А. ЯМЩИКОВА<sup>1,2</sup>, В.М. ЯМЩИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

## РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ОБЛАСТИ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА

В работе представлены основные положения теории отражения рентгеновского излучения от границы раздела двух сред, а также описаны методы расчета коэффициентов отражения и поглощения при прохождении через границы многослойной среды. Рассмотрены наиболее часто применяемые элементы многослойной рентгеновской оптики и факторы, определяющие эффективность отражения излучения.

M.A. YAMSCHIKOVA<sup>1,2</sup>, V.M. YAMSCHIKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSUE RFNC – VNIIEF, Sarov, Russia

<sup>2</sup>Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

## COMPUTATIONAL AND THEORETICAL STUDY OF THE MULTILAYER METAL MIRRORS CHARACTERISTICS IN THE REGION OF SOFT X-RAY SPECTRUM

The paper presents the basic principles of the X-ray radiation reflection theory from the interface between two media, and also describes methods for calculating the reflection and absorption coefficients when radiation passes through the boundaries of a multilayer medium. The most commonly used elements of multilayer X-ray optics and the factors that determine the efficiency of radiation reflection are considered.

Совершенствование оптических приборов, с помощью которых можно управлять мягким рентгеновским излучением ( $\lambda \sim 10$  нм), является актуальной задачей на сегодняшний день. Развитие различных плазменных источников рентгеновского излучения, а также рентгеновская астрономия Солнца требует постоянного повышения отражательной способности оптических элементов [1].

Однако из-за специфики взаимодействия рентгеновского излучения с веществом возникают проблемы создания оптических элементов. В отличие от видимого света, для рентгеновского диапазона оптические зеркала и линзы неэффективны [2], что является следствием близкого к единице показателя преломления и сильного поглощения практически всеми материалами [3]. С развитием технологии синтеза многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) появилась возможность управления рентгеновским излучением. Многослойные рентгеновские зеркала представляют собой периодические структуры, состоящие из слоев материалов с различными оптическими константами. Особенности рентгеновских зеркал являются предельно малые (до нескольких нм) толщины периодических слоев, большое число (до 300) периодов и сильное поглощение практически всеми материалами. Необходимость большого числа периодов вызвана низкими коэффициентами отражения от одной границы.

Несмотря на то, что к настоящему времени существует несколько готовых программных инструментов для определения отражательной способности многослойных рентгеновских зеркал, большинство из них в пользовательском режиме не позволяют напрямую получать информацию об изменениях электромагнитного поля при прохождении излучения через слоистую среду.

В ходе работы была решена задача распространения электромагнитного излучения в слоистой среде, реализован программный модуль по определению коэффициента отражения многослойных зеркал. Полученный результат дает возможность определения изменения электромагнитного поля при использовании мощных потоков излучения. Развитием данного исследования может служить поиск наиболее оптимальных параметров покрытия слоев металлических зеркал при интересующей длине волны на основе оптимизационного алгоритма поиска.

### Список литературы

1. Ю.А. Вайнер, С.А. Гарахин, С.Ю. Зуев и др. Многослойные зеркала на основе бериллия для мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового диапазонов длин волн // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. № 7 (2020). С. 3-14.
2. А.В. Виноградов, И.А. Брытов, А.Я. Грудский и др. Зеркальная рентгеновская оптика / Под ред. А.В. Виноградова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 463 с.
3. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. *Atom. Data Nucl. Data Tabl.* **54** 181 (1993)

Е.А. ЯРУНОВА, А.А. КРЕНЦ, Н.Е. МОЛЕВИЧ

Самарский университет, Самара, Россия

СФ ФИАН, Самара, Россия

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНЖЕКЦИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ НЕЛИНЕЙНОГО УСИЛЕНИЯ

Свободно работающий широкоапертурный поверхностно излучающий лазер с вертикальным резонатором (VCSEL) излучает нерегулярную динамику, так как подвержен модуляционной неустойчивости. Известно, что дополнительное внешнее оптическое излучение слабой амплитуды позволяет подавить неустойчивости и получить пространственно-однородное излучение. Для качественной оценки эффективности метода необходимо учитывать эффекты нелинейного усиления для инверсии населенности. Показано, что учет нелинейного усиления не разрушает эффект стабилизации, а лишь немного увеличивает пороговое значение амплитуды оптической инжекции необходимой для стабилизации.

E.A. YARUNOVA, A.A. KRENTS, N.E. MOLEVICH

Samara National Research University, Samara, Russia

Lebedev Physical Institute, Samara, Russia

## STABILIZATION OF VCSEL RADIATION USING EXTERNAL OPTICAL INJECTION WITH CONSIDERATION OF NONLINEAR GAIN EFFECTS

A free-running broad-area surface-emitting laser with a vertical resonator (VCSEL) emits irregular dynamics because it is subject to modulation instabilities. It is known that additional external optical injection of weak amplitude can suppress the instabilities and obtain spatially uniform radiation. For a qualitative assessment of the efficiency of the method, it is necessary to take into account the effects of nonlinear amplification for population inversion. It is shown that the consideration of nonlinear amplification does not destroy the stabilization effect, but only slightly increases the threshold value of the amplitude of optical injection necessary for stabilization.

Для описания динамики VCSEL успешно используется система дифференциальных уравнений для обгибающих электрического поля  $E$  и инверсии населенностей  $N$  [1]:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma[E_{inj} - (1+i\theta) + (1-i\alpha)f(N)]E + i\Delta_{\perp}E, \\ \frac{\partial N}{\partial t} = [I_p - N - |E|^2]f(N), \end{cases}$$

где функция  $f(N)$  содержит зависимость коэффициента усиления от плотности носителей. Ранее было сделано упрощение, что  $f(N) = N$ . Выполненный ранее линейный анализ устойчивости показал, что режим пространственно-однородной генерации подвержен модуляционной неустойчивости [2,3]. В результате такое устройство генерирует излучение со слабой пространственной и временной когерентностью (рис.1(а)). Для улучшения качества излучения уже предложен метод внешнего оптического излучения, позволяющий слабой амплитудой  $E_{inj}$  ведущего лазера стабилизировать динамику ведомого. Ранее выполненные исследования не учитывали эффекты нелинейного усиления. В действительности кривая максимального усиления лучше аппроксимируется в предположении квадратичной зависимости относительно плотности носителей, что приводит к  $f(N) = N(1 - \beta N)$ . Численные расчеты показали, что учет коэффициента нелинейного усиления не разрушает эффект стабилизации, при этом лишь незначительно увеличивает значение амплитуды внешнего излучения до 2% от генерируемого. На рис.1(б) и (в) хорошо видно затухание инкрементов, что говорит о стабилизации. Учет нелинейного усиления в дальнейшем может повлиять на определение области формирования пространственных структур, что требует дальнейшего изучения. Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2023-0009, FFMR-2024-0017).

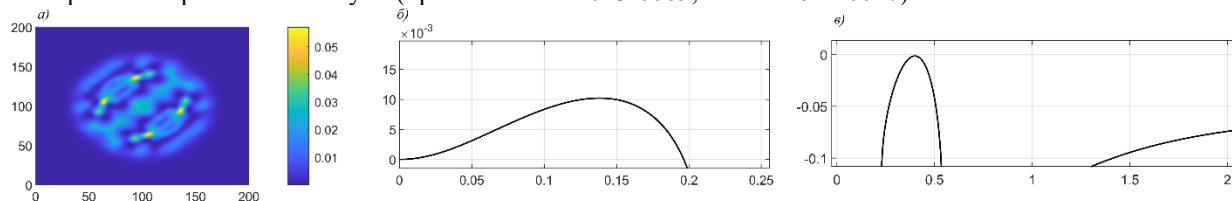


Рис. 1. а) Нерегулярная динамика, генерируемая широкоапертурным VCSEL. Дисперсионные кривые, отражающие неустойчивость для б) свободно работающего лазера в) стабилизированного

### Список литературы

1. Ahmed W.W., Kumar S. and others // Physical review A 2015. Vol. 92, P. 043829-1-043829-8.
2. Yarunova E.A., Krents A.A., Molevich N. E. // Opt. Lett. 2023. Vol. 48, P. 4021-4024
3. Yarunova E.A., Krents A.A., Molevich N. E. // Computer Optics. 2023. Vol. 47, P. 920-92

## ЭФФЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВ

Представлен процесс получения сферического порошка в широком диапазоне размеров 30 мкм - 200 мкм, при котором проволока нагревается коническим лазерным пучком и атомизируется потоком газа, а для получения нанопорошка непрерывный приповерхностный оптический разряд с температурой 20 кК формируется с помощью конических лазерных пучков в потоке инертного газа, в который материал вводится в виде проволок или сырого порошка. Конденсация частиц сильно и быстро гасится потоком инертного газа, что приводит к сильному пересыщению. Производительность процесса 2 кВтч /кг при мощности лазера 16 кВт.

Yu. CHIVEL  
MerPhotonics, Saint Etienne, France

## AN EFFECTIVE LASER METHOD FOR PRODUCING POWDERS

A process for producing spherical powder in a wide size range of 30  $\mu\text{m}$  - 200  $\mu\text{m}$  is presented, in which the wire is heated by a conical laser beam and atomized by a gas flow, and to obtain nanopowder, a continuous near-surface optical discharge with a temperature of 20 kK is formed using conical laser beams in a flow of inert gas, into which the material is introduced in the form of wires or raw powder. Condensation of particles is strongly and quickly extinguished by the flow of inert gas, which leads to severe supersaturation. The process productivity is 2 kWt ч/kg with a laser power of 16 kW.

Известны метод и реализующее его устройства для получения нанопорошков путем испарения мишени лазерным лучом и последующей конденсации паров материала мишени в потоке газа. Производительность не превышает 100 г/ч при энергозатратах 40 Вт ч/г. Имеются многочисленные работы по получению наночастиц в жидкости методом лазерной абляции. Но их эффективность крайне низка.

Наиболее продуктивными в настоящее время являются методы газового и плазменного распыления. При распылении газа сверхзвуковые струи газа распыляют струю расплавленного металла. Диапазон размеров получаемых частиц -30-200 мкм. Но очень высоки затраты на плавку большой массы металла при мощности 100кВт и эффективность процесса 4 кВт ч/кг.

Плазменное распыление, по-видимому, является технологией, обеспечивающей наилучший выход качественных порошков в диапазоне 30-200 микрон. Семейство процессов плазменной атомизации остается очень неэффективным с энергетической точки зрения. Например, типичный плазменный распылитель [1] может использовать три плазменные горелки мощностью 45 кВт каждая. Это соответствует 143 кВт чистой мощности для обработки 5 кг/ч, что соответствует 28,6 кВт-ч/кг.

Кроме того, эти процессы не позволяют получать наноразмерные частицы.

Таким образом, крайне актуальна разработка новых устройств и способов производства сферических порошков с широким диапазоном размеров частиц от нано до 100 микрон в крупном промышленном масштабе.

Основной причиной низкой эффективности процессов промышленного производства порошков является низкая концентрация потока энергии. При плазменном распылении диаметр напыляемой проволоки составляет 3 мм, а диаметр плазменных потоков - 20 мм. При газовом распылении большое количество металла расплавляется неэффективно. Разработан новый подход к процессу получения порошков с использованием высококонцентрированного источника энергии - лазера и специальных оптических схем с использованием конических лазерных пучков.

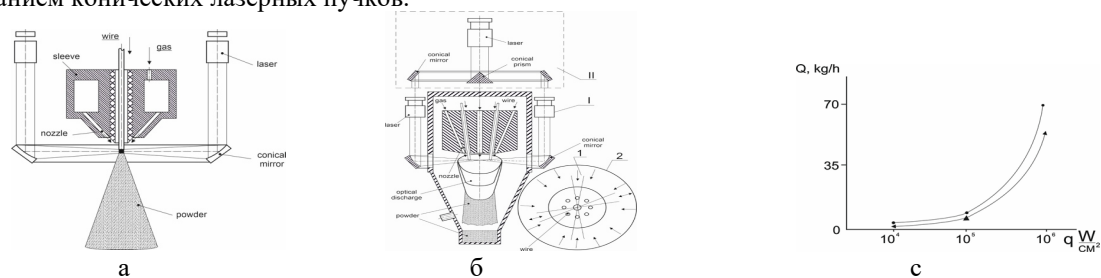


Рис. 1 Схема лазерной газовой атомизации (а); схема получения нанопорошков (б); производительность процесса: \* - испарение восьми 1 мм проволок; ▲-лазерная атомизация 2 мм проволоки (с).

Разработанная оптическая система лазерной газовой атомизации (ЛГА) представлена на рис.1.

В этой системе проволока вводится в фокальную область одного конического луча или в фокальную область системы из нескольких лучей, расположенных по периметру. Конец проволоки нагревают до плавления и распыляют сверхзвуковыми струями инертного газа – атомизируют.

Для движущегося источника распределение температуры по поверхности ( $z = 0$ ) в движущейся системе координат  $XU$  имеет вид :

$$T(x,y) = [Aqr^2 / 2\pi k(x^2 + y^2)] \exp\{ [-V(x + (x^2 + y^2)^{1/2}) / 2a] \} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость,  $r$  – радиус фокального пятна,  $q$  – плотность мощности,  $A$  – поглощающая способность.

Проведены расчеты процесса нагрева стальной проволоки диаметром 2 мм. Диаметр пятна фокусировки на проволоке 2 мм (рис.1). Проведенные расчеты показали, что при интенсивности  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> полное плавление проволоки происходит при скорости подачи проволоки 4 см/с и производительность процесса определяется скоростью волны плавления:

$$V = A q / L_m + \rho C T_m \quad (2)$$

где  $L_m$  – удельная теплота плавления,  $\rho$  – плотность,  $C$  – удельная теплоемкость,  $T_m$  – температура плавления.

Производительность процесса — до 5 кг/час при мощности лазерного излучения 10 кВт (рис. 1с). При таком процессе распыления, как и при газовом и плазменном распылении, размер получаемых частиц находится в диапазоне 30–100 мкм.

В то же время проблема получения наноразмерных порошков с высокой промышленной производительностью является чрезвычайно актуальной.

Для получения нанопорошков используется конденсация частиц из паровой фазы. Паровую фазу получают путем абляции материала лазером, электрической дугой и т.п. с последующей конденсацией в непрерывном потоке газа, так называемая газофазная конденсация. Но производство наночастиц в промышленных масштабах не достигнуто, поскольку масштабы устройств крайне малы.

Наш подход основан на использовании уникальных свойств конических лазерных пучков и непрерывного оптического разряда (рис.1б). Это дает возможность увеличить габариты устройств при высокой удельной мощности энергозатрата. Испаряемый объект в виде системы проволок диаметром около 1 мм вводится в область фокуса конического лазерного луча 2 из лазерной системы II или системы из нескольких I, лучей I, конически сфокусированных коническое зеркало. Часть лазерного излучения испаряет проволоочки, непрерывно подаваемые в эту зону. Оставшаяся часть потока лазерного излучения фокусируется в небольшое пятно и генерирует в парах проволок и окружающем газе непрерывный оптический разряд размером порядка нескольких см.

Оптический разряд располагается в резонаторе лазера, что позволяет использовать лазеры с любой длиной волны. Рассмотрен процесс нагрева и испарения тонкой проволоки при ее введении в плазму оптического разряда с одновременным воздействием лазерного излучения.

Предельная скорость введения проволок в область испарения и плазмообразования будет определяться скоростью волны испарения в проволоке. :

$$V = A q / L_e + \rho C T_e \quad (3)$$

При  $q = 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> скорость подачи составит 3,5 см/с, а производительность процесса при испарении 8 проволок составит 7 кг/час. Испаренный материал продувается через плазму оптического разряда потоком инертного газа и на выходе из разряда начинает конденсироваться в потоке газа при наивысшей степени пересыщения, образуя наночастицы.

Производительность процессов лазерной атомизации достигает нескольких килограммов порошка в час при мощности лазера 16 кВт и производительности 1- 2 кВтч/кг, что в пять раз выше чем при плазменной атомизации, а сам процесс абсолютно экологичен.

#### Список литературы

[1] Rao L, Carobin P. Thermal plasma torches for metallurgical applications. Annual Conference of Metallurgist CIM 2012:59-68.

[2] Chivel Yu. Proceedings World PM 22, Lyon, 5371750, 2022

Ю.А.ЧИВЕЛЬ  
*MerPhotonics, Сент Этьенн , Франция*

## ПОЛУЧЕНИЕ МУЛЬТИ-МАТЕРИАЛЬНЫХ 3Д ИЗДЕЛИЙ СЕЛЕКТИВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

Разработан новый метод 3D-производства деталей из нескольких материалов. Представлена и обсуждается концепция машины SLM и концепция системы очистки строительной платформы. Оценено влияние растворения на точность границ различных металлов . Представлены результаты экспериментальных исследований перекрестного загрязнения материалов. Сконструирована экспериментальная машина multi 100 SLM.

Yu. CHIVEL  
*MerPhotonics, Saint Etienne, France*

## OBTAINING MULYI- MATERIAL 3D PRODUCTS BY SELECTIVE LASER MELTING

New method for 3D multi-material parts production has been elaborated. SLM machine concept and concept of the build platform cleaning system is presented and discussed. Influence of dissolution on the accuracy of the boundaries of various metals is estimated . Results of experimental investigations of material cross - contamination are presented. Experimental multi 100 SLM machine has been constructed

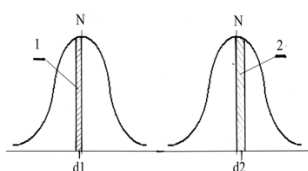
Системы аддитивных технологий с одним материалом не могут удовлетворить требования некоторых приложений, которые требуют нескольких материалов в одном объекте , таких как совместимые механизмы, встроенные компоненты, 3D-схемы [1]. Используя компоненты из нескольких материалов, можно получить экономичные и легкие конструкции за счет сокращения необходимых процессов сборки и количества деталей. Большие усилия прилагаются к разработке систем изготовления изделий из нескольких материалов.

Для получения металлических мульти-материальных изделий используется селективная лазерная наплавка, с помощью которой можно получить 3D-изделие из нескольких материалов, но точность производства не превышает 100-200 микрон и изделие требует значительной доработки, например, фрезерования.

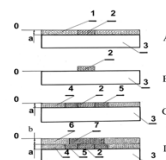
Процесс селективного лазерного спекания/плавления (SLS/SLM) хорошо подходит для включения нескольких порошкообразных материалов .

Но в настоящее машины для производства изделий из нескольких материалов методом селективного лазерного спекания/плавления (SLS/SLM), позволяющего получить точность до 10 микрон, отсутствуют.

Нами разработан и запатентован [2] новый метод и машина SLM для трехмерного производства деталей из нескольких материалов , в которых можно использовать стандартные системы нанесения покрытия с помощью ролика или лезвия. Основная идея заключается в использовании узкой фракции порошков различных материалов с различным средним размером частиц и специального алгоритма спекания порошкового слоя. Это не только делает возможным создание трехмерных деталей из нескольких материалов, но и позволяет отделить неспеченные порошки различных материалов для повторного использования. После завершения спекания 3D-объекта неспеченный порошок извлекается из камеры сборки и проводится разделение порошков по диаметрам путем просеивания, при этом происходит разделение порошков разнородных материалов.



а



б

Рис. 1. (а) - Распределение порошков по размерам; (б)- алгоритм спекания

Для реализации нового метода получения мульти-материальных изделий была разработана концепция машины SLM [3]. Машина SLM состоит из лазера, лазерного сканера с линзой F-teta, технологической камеры, камеры построения с поршнем , который перемещает слой порошка и 3D-объект в вертикальном



направлении, нескольких емкостей подачи, модульной системы укладки порошка для повторного нанесения покрытия, которая состоит из несколько одинаковых модулей, система очистки для удаления неспеченного порошка, просеивающая станция для сбора, разделения и вакуумной транспортировки неспеченного порошка в емкости подачи порошка для повторного использования. Суть концепции поясняется на рис.2.

Первый образец изделия, полученный в институте Фраунгофера с использованием представленного метода показан на рис.2 д.

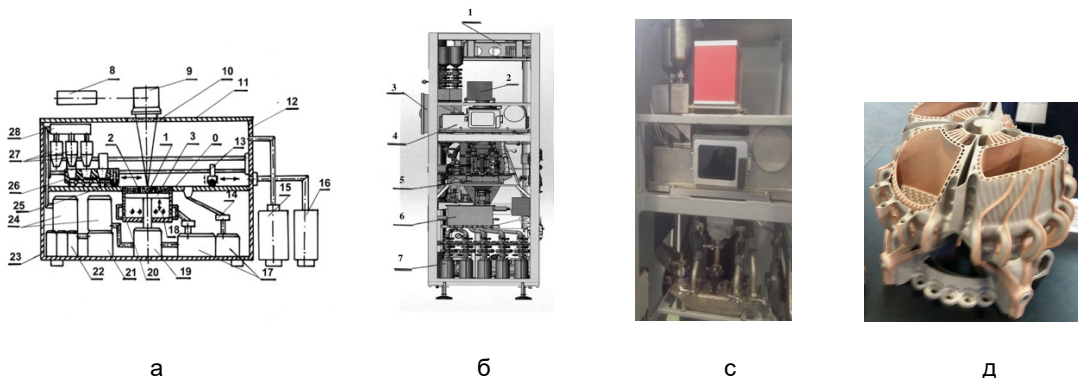


Рис.2 (а) -Конструкция машины селективной лазерной плавки. (б) - эскизный проект (с) -экспериментальный образец SLM машины ;

образец мульти-материального изделия медь-сталь. Изготовлен в Институте Фраунгофера.

#### Список литературы

- 1.Ott M.; Zaeh M Symposium 2014 , University of Texas, Austin, USA, 2014, pp.220- 226 Multi-material processing in additive manufacturing. In Proceedings SFF
- 2.Chivel Yu. Method for producing three -dimensional objects from powder and device for implementing same. RU 2580145 , WO 201507539,2014, US 15/038,036 ,2016.
- 3 .Chivel Yu. New Approach to Multi-material Processing in Selective Laser Melting. Physics Procedia .2016, 83, 891- 895.

Н.А. ИНОГАМОВ<sup>1,2</sup>, В.В. ЖАХОВСКИЙ<sup>2</sup>, В.А. ХОХЛОВ<sup>1</sup>, Ю.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теоретической физики им. Ландау РАН, Черногловка, Россия

<sup>2</sup>Всероссийский НИИ автоматики имени Н. Л. Духова, ГК Росатом, Центр фундаментальных и прикладных исследований, Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА ЭЛЬФ НИЯУ МИФИ В ТЕХНОЛОГИЯХ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Диаметр пятна освещения на поверхности мишени  $2R_L$  и длительность импульса  $\tau_L$  являются важными параметрами, определяющими глубину и характер модификации/упрочнения материала после лазерного воздействия. Установка ЭЛЬФ НИЯУ МИФИ является с одной стороны достаточно мощной (это позволяет варьировать размер  $R_L$ ), с другой стороны имеется возможность, во-первых, менять длительность наносекундного импульса, плюс, во-вторых, применять пикосекундное воздействие. Эксперименты на этой установке совместно с численным моделированием позволят подобрать наилучшие условия облучения по параметрам  $R_L$  и  $\tau_L$  в плане достижения требуемых высоких степеней упрочнения конкретных конструкционных материалов.

N.A. INOGAMOV<sup>1,2</sup>, V.V. ZHAKHOVSKY<sup>2</sup>, V.A. KHOKHLOV<sup>1</sup>, YU.V. PETROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>L.D. Landau Institute for Theoretical Physics of Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia

<sup>2</sup>N.L. Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

## Application of MEPhI ELF laser complex in technologies of material hardening

The diameter of the illumination spot on the target surface  $2R_L$  and the pulse duration  $\tau_L$  are important parameters determining the depth and nature of material modification/hardening after laser treatment. The MEPhI ELF facility is on the one hand powerful enough (it allows to vary the  $R_L$  size), on the other hand it is possible, firstly, to change the nanosecond pulse duration, plus, secondly, to apply picosecond laser illumination. Experiments at this facility together with numerical modeling will allow us to select the best irradiation conditions for  $R_L$  and  $\tau_L$  parameters in terms of achieving the required high degrees of hardening of specific structural materials.

Наша группа занимается проблемами лазерного ударного упрочнения. В состав исследователей, кроме указанных в заголовке, входят ученые из ОИВТ РАН, ИПХФ РАН и ИАП РАН. Нами получен ряд результатов, которые имеют отношение к установке ЭЛЬФ. Исследовано влияние размера фокального пятна на глубину модификации материала [1]. Дело в том, что при прочих равных условиях затухание лазерной ударной волны (УВ) в толще мишени определяется размером пятна [1]. Традиционно лазерным упрочнением занимаются с применением наносекундных (нс) лазеров, облучающих мишень через слой воды миллиметровой толщины, см., например, обзорную часть работы [2]. Соответственно возникают проблемы с формированием плазмы на границе прозрачной воды и непрозрачного поглощающего металла. Часто проблему делят на две части: одна из них суть абляция в жидкость [2-7], вторая - генерация лазерной УВ [8-11]. Разумеется, в проблемах лазернойковки эти части образуют единое целое. Новые вопросы, изученные нашей группой, относятся, во-первых, к применению ультракоротких лазерных импульсов (субпикосекунды) для технологий упрочнения [2,9,10] – вместо традиционных нс-импульсов. Во-вторых, показано, что в случае субпикосекунд не требуется жидкий слой и поглощающая пленка. В-третьих, определены особенности преобразования структуры кристаллитов при генерации плавящей УВ [9,10]. В технологиях обработки поверхности много внимания уделяют поверхностным рельефам [12], связи между рельефом и параметрами воздействия.

### Список литературы

1. Shepelev V.V. and others // Optics & Laser Technology 2022. Vol. 152, 108100
2. Иногамов Н.А. и др. // Письма в ЖЭТФ 2022. Том 115, вып. 1, стр. 20-27
3. Иногамов Н.А., Жаховский В.В., Хохлов В.А. // ЖЭТФ 2018. Том 154, вып. 1(7), стр. 92-123
4. Petrov Y.V. and others // Applied Surface Science 2019. Vol. 492, p. 285-297
5. Petrov Y.V. and others // Contrib. Plasma Phys. 2019. Vol. 59(6), P. e201800180
6. Inogamov N.A. and others // Opt Quant Electron 2020. Vol. 52, article number 63
7. Inogamov N.A. and others // JETP Lett. 2021. Vol. 113, p. 75-81
8. Иногамов Н.А. и др. // Письма в ЖЭТФ 2022. Том 115, вып. 2, стр. 80-88
9. Хохлов В.А. и др. // Письма в ЖЭТФ 2022. Том 115, вып. 9, с. 576-584
10. Zhakhovsky V.V. and others // Phys. of Fluids 2023. Vol. 35, 096104
11. Makarov S.S. and others // Matter Radiat. Extremes 2023. Vol. 8, 066601
12. Milov I. and others // Applied Surface Science 2020. Vol. 528, 146952

Н.Е. АНДРЕЕВ

*Объединенный Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия  
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

## **СВЕРХЯРКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ МЭВ-НОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ПЕН, ОБЛУЧАЕМЫХ РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИ ИНТЕНСИВНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

Лазерные источники частиц высоких энергий и жесткого излучения представляют большой интерес в связи с широким использованием при создании и диагностике экстремальных состояний вещества. Обсуждается концепция создания эффективных лазерных источников жесткого излучения на основе генерации релятивистских электронов в пенах низкой плотности в режиме прямого лазерного ускорения.

N.E. ANDREEV

*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia*

## **ULTRA-BRIGHT LASER-DRIVEN SOURCES OF MEV PARTICLES AND RADIATION USING LONG-SCALE FOAMS IRRADIATED WITH RELATIVISTICALLY-INTENSE LASER PULSES**

Laser sources of high-energy particles and hard radiation are of great interest due to their widespread use in the creation and diagnosis of extreme states of matter. The concept of creating efficient laser sources of hard radiation based on the generation of relativistic electrons in low-density foams in the direct laser acceleration mode is discussed.

Эксперименты и численное моделирование продемонстрировали высокоэффективное преобразование энергии лазера в энергию МэВ-частиц и излучения. В экспериментах, при взаимодействии субпикосекундных лазерных импульсов мощностью  $\sim 10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup> с предварительно ионизированными полимерными пенами, были получены высокоинтенсивные пучки электронов, ускоренных в режиме прямого лазерного ускорения (DLA), с эффективной температурой, в 10 раз превышающей пондеромоторный потенциал, и с зарядом до 100 нС направленной фракции электронов с энергией выше 7,5 МэВ [1, 2]. Эти результаты хорошо согласуются с 3D PIC-моделированием [1 - 4].

При использовании полимерных пен в сочетании с фольгой или с конвертером из материала с высоким зарядом ядра, были успешно продемонстрированы:

- 1) генерация сверхяркого тормозного излучения с энергией фотонов до 50-60 МэВ и рекордным КПД преобразования до 2 % в фотоны с энергиями  $> 7,5$  МэВ (гигантский дипольный резонанс) [2, 5-7];
- 2) рекордная эффективность производства нейтронов в гамма-ядерных реакциях [5, 7];
- 3) сверхинтенсивное бетатронное излучение [8, 9];
- 4) усиленное ускорение протонов (TNSA);
- 5) применение DLA электронов для изучения Flash-эффекта.

Проведенные эксперименты и численное моделирование показали высокую устойчивость процесса DLA по отношению к изменениям параметров лазерного импульса и мишени. Полученные результаты с использованием полимерных пен указывают на направление для создания высокоэффективных сверхярких лазерных источников частиц и фотонов с энергией в десятки МэВ уже при умеренной релятивистской интенсивности лазера, что характерно для крупных лазерных кДж установок РВ класса, используемых в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу.

### *Список литературы*

1. Rosmej O. N., Andreev N. E., Zaechter S., et al. *New J. Phys.* 21 043044 (2019).
2. Rosmej O.N. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion* 62 (2020) 115024
3. Andreev N. E., Popov V. S., Rosmej O. N., et al. *Quantum Electronics* 51 1019–1025 (2021).
4. Andreev N. E., Umarov I. R., Popov V. S. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute.* 50 Suppl. 7 S797–S805 (2023).
5. Günther M. M., Rosmej O. N., Tavana P., Gyrdymov M., Skobliakov A., Kantsyrev A., Zähler S., Borisenko N. G., Pukhov A., & Andreev N. E. *Nature Communications* 13 170 (2022).
6. Tavana P., et al. *Front. Phys.* 11 1178967 (2023).
7. Andreev N. E., Umarov I. R., Popov V. S. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques* 17 (4) 848–854 (2023).
8. Shen X. F., Pukhov A., Rosmej O. N., Andreev N. E. *Phys. Rev. Applied* 18 064091 (2022).
9. Cikhardt J., et al. *Matter Radiat. Extremes* 9 (2) 027201 (2024).

Н.Г. БОРИСЕНКО

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева  
Российской академии наук, Москва, Россия*

## **МИШЕНИ И ВОЗМОЖНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ «ПЕРВОГО ДНЯ» ДЛЯ ПРОГРАММЫ ЭЛЬФ**

Представляются для обсуждения предложения подготовительной фазы работ по возможным мишеням для ближайших экспериментов в программе ЭЛЬФ.

N.G. BORISENKO

*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **TARGETS AND THE POSSIBLE “FIRST DAY” INVESTIGATIONS ON THE ELF LASER**

The preparation phase for the targets of the “first day” experiments is proposed for the discussion.

С постройкой каждого нового лазера на новой экспериментальной, диагностической, да и созданной ко времени ввода установки теоретической базе начинаются, в общем, традиционные для лазерной плазмы исследования. Устанавливаются пространственно-временные, спектральные, температурные профили плазмы от разных мишеней, распространение волн ионизации и изучение других характеристик плазмы в динамике, устойчивость, самосвечение плазмы, прохождение ударных волн и вторичные источники частиц и э.-м. волн из лазерной плазмы, изучение других регистрируемых свойств при разных возможных условиях облучения.

Никогда эти исследования не оказываются просто повторением чужих или предыдущих экспериментов как из-за уникальности как мощного лазера, так и из-за особенностей возможной на установке и реализованной диагностики с современными уже характеристиками, всегда давая оригинальные и новые данные из области физики высокотемпературной плазмы и экстремального состояния вещества. С точки зрения мишеней для каждого лазера и серии экспериментов обычно не обойтись без разработки или модернизации методов создания мишеней, конструкция которых тесно связана с устройством камеры взаимодействия и имеющихся диагностических устройств, а также со стоящими в лазерном эксперименте задачами.

Все вместе сильно зависит от этапов и реализации схем установки и оборудования. Тем не менее со стороны мишеней видна задача обеспечения определенного количества экспериментов «первого дня», которые при лаконичной постановке эксперимента на еще не полностью оптимизированном лазере давали бы презентабельный и оригинальный результат, показывающий успешный ввод установки в экспериментальный режим и убедительный для продолжения программы и финансирования.

Представляются для обсуждения предложения по подготовке возможных мишеней для ближайших экспериментов в программе ЭЛЬФ

С.Г. БОЧКАРЕВ, О.Е. ВАЙС, М.Г. ЛОБОК, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН ФИАН, Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ В РЕЖИМЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ПИКОСЕКУНДНЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Предлагается использовать лазерную систему килоджоульного уровня «ЭЛЬФ» для получения сильноточного релятивистского пучка электронов (СРЭП) с применением низкоплотных сред околокритической плотности в качестве мишени. Реализация режима стохастического нагрева электронов позволит поднять выход релятивистских электронов и вторичного ЭМИ, что является необходимым для создания высокоэффективного источника, требуемого для радиационно-ядерных приложений. Рассматриваемый режим может реализовываться в результате ускорения в сложной полевой структуре лазер-плазменного канала, включающей лазерное, электростатические плазменные и квазистатические электромагнитные поля. В частности, ожидается существенный вклад от взаимодействия электронов с возникающими турбулентными плазменными колебаниями вследствие развития неустойчивости вынужденного комбинационного рассеяния вперед. Планируемые оптимизационные расчетно-теоретические исследования стохастического ускорения электронов будут использоваться для сопровождения соответствующих экспериментов и последующих экспериментальных постановок для радиационно-ядерных задач.

S.G. BOCHKAREV, O.E. VAIS, M.G. LOBOK, V.YU. BYCHENKOV

*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

## **GENERATION OF HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS THROUGH STOCHASTIC HEATING BY HIGH-POWER PICOSECOND PULSE**

It is proposed to use a kilojoule-level laser system "ELF" to produce a high-current relativistic electron beam using low-density media of near-critical density as a target. The implementation of the stochastic electron heating will make it possible to increase the yield of relativistic electrons and secondary EMR, which is necessary to create a highly efficient source required for radiation-nuclear applications. The regime under consideration can be realized as a result of acceleration in the complex field structure of the laser-plasma channel, including laser, electrostatic plasma and quasi-static electromagnetic fields. In particular, a significant contribution is expected from the interaction of electrons with the resulting turbulent plasma oscillations due to the development of the instability of stimulated forward Raman scattering. Planned optimization computational and theoretical studies of stochastic acceleration of electrons will be used to accompany relevant experiments and subsequent experimental formulations for radiation-nuclear problems.

Интенсивный короткий лазерный импульс с продольным размером, соизмеримым с длиной волны плазменных колебаний, способен эффективно возбуждать кильватерную волну в разреженной плазме и тем самым ускорять небольшую группу электронов до максимальной энергии. Другие лазерно-плазменные схемы ускорения электронов опираются на применение мощных импульсов большей длительности и энергетики. Такие импульсы при фокусировке проходят стадию самомодуляции. В частности, это имеет место при развитии неустойчивости вынужденного комбинационного рассеянием света (ВКР), что сопровождается ускорением электронов. Однако в литературе в качестве базового механизма ускорения под действием мощного пикосекундного импульса, как правило, рассматривается так называемое “прямое” лазерное ускорение в режиме бетатронного резонанса при распространении лазерного импульса в образующемся плазменном канале (см., например, [1]). В таком режиме число лазерно-ускоренных до высоких энергий электронов может быть ограничено из-за небольшого числа резонансных частиц.

Более высокая эффективность ускорения электронов может быть обусловлена наличием регулярных и нерегулярных плазменных волн, развивающихся во всем объеме лазер-плазменного взаимодействия вследствие ВКР неустойчивости. Ожидаемый темп ускорения в турбулентных плазменных полях [2] вероятно будет выше, чем темп прямого ускорения электронов в плазменном канале. Однако, вклад стохастически нагреваемых электронов в характеристики СРЭП требует детального изучения, что потребует привлечение многомерного численного моделирования методом частица-в-ячейке (PIC).

Предлагается использовать лазерный импульс установки «ЭЛЬФ» килоджоульного уровня мощности для исследования роли стохастического ускорения в формировании СРЭП и его применения для радиационно-ядерных приложений. Последнее может основываться на использовании плазмы околокритической плотности, образуемой при гомонегизации инновационных мишеней из пены или аэрогеля под действием дополнительного наносекундного предимпульса [1]. Отметим, что сами пены без предварительной гомонезации, специально микроструктурированные среды или мишени из крупных кластеров (микрокапель), облучаемые лазером «ЭЛЬФ», могут служить источниками ЭМ излучения в широком интервале частот: терагерцового, инфракрасного, ультрафиолетового, мягкого рентгеновского диапазонов, расчеты эффективности которых будут также проведены.

*Список литературы*

1. M. M. Günther, O. N. Rosmej, P. Tavana, et al // Nature Comm. 2022. V. 13. P. 170.
2. S. G. Bochkarev, A. V. Brantov, V. Yu. Bychenkov, et al // Plasma Physics Reports 2014. V. 40 P. 202.

.В. БРАНТОВ, М.А. РАКИТИНА, С.И. ГЛАЗЫРИН, А.С. КУРАТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН ФИАН, Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОТОЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ И СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРЕНИЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ**

Предлагается использовать пикосекундный лазерный импульс установки ЭЛЬФ для получения сильноточного релятивистского пучка электронов (СРЭП), ускоренных в мишенях с контролируемой преплазмой на облучаемой стороне. Преплазма создается под действием наносекундного предимпульса усиленного спонтанного излучения и/или дополнительного наносекундного импульса, синхронизированного с основным пикосекундным импульсом. В последнем случае возникает возможность управления преплазмой с целью максимизации тока СРЭП. Получение лазерно-инициируемого СРЭП открывает возможности генерации мощных потоков релятивистских ионов, ускоряемых в двойном слое образующегося виртуального катода на тыльной стороне мишени, а также генерации излучения КВЧ и ТГц волн, возникающего в результате переходного излучения части электронов СРЭП, покидающих мишень. Оптимизация таких процессов коллективного ускорения и излучения будет предметом детальных исследований.

A.V. BRANTOV, M.A. RAKITINA, S.I. GLAZYRIN, A.S. KURATOV, V.YU. BYCHENKOV

*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia*

## **GENERATION OF HIGH-CURRENT RELATIVISTIC ELECTRON BEAMS AND ACCOMPANYING PROCESSES OF COLLECTIVE ACCELERATION AND RADIATION**

It is proposed to use a picosecond laser pulse from the ELF installation to produce a high-current relativistic electron beam (REB) accelerated in targets with controlled preplasma on the irradiated side. Preplasma is created either by nanosecond prepulse of amplified spontaneous emission or an additional nanosecond pulse synchronized with the main picosecond pulse. In the latter case, it becomes possible to control the preplasma in order to maximize the REP current. Production a laser-initiated REP opens up the possibility of generating powerful fluxes of relativistic ions accelerated in the double layer of the resulting virtual cathode on the back side of the target, as well as generating radiation of EHF and THz waves by the transition radiation of a portion of the REP electrons leaving the target. Optimization of such processes of collective acceleration and radiation will be the subject of detailed studies.

Один из возможных способов достижения высокой эффективности лазерных источников заряженных частиц (коэффициента конверсии и выхода высокоэнергетичных частиц) и вторичного электромагнитного излучения связан с использованием мишеней с контролируемой преплазмой на облучаемой стороне. Преплазма может создаваться наносекундным предимпульсом усиленного спонтанного излучения или дополнительным, искусственным импульсом также наносекундной длительности [1]. Формируемый длинный плазменный факел обладает свойствами во многом схожими с плазмой околоскритической плотности, образуемой при гомонегизации пенных мишеней или мишеней из аэрогеля, которые и способны обеспечить эффективное поглощение энергии лазерного импульса и генерацию рекордного числа горячих электронов, имеющих целый ряд практических применений [2]. Поскольку характерный градиент плотности и длина разлетающейся преплазмы являются ключевыми параметрами эффективности лазер-плазменного взаимодействия и ускорения электронов (см., например, [1]), вариация положения пятна фокусировки лазерного импульса и угла падения излучения относительно поверхности основной мишени позволяет достичь оптимизации схемы облучения. При использовании дополнительного наносекундного импульса возникает возможность контролировать профиль преплазмы, меняя время задержки прихода основного пикосекундного импульса. На характеристики преплазмы также можно влиять нанесением тонкого покрытия из определенных материалов и структур. Проведенные предварительные численные расчеты уже показали, что манипулирование даже естественной преплазмой твердотельной мишени за счет определенной фокусировки лазерного света способно значительно увеличивать эффективность ускорения электронов короткими мощными лазерными импульсами.

Эффективное ускорение электронов является необходимым условием создания источников вторичного излучения в различных диапазонах частот и ускоренных ионов. Наиболее энергетичные пучки электронов, ускоряемые, как правило, в преплазме в направлении распространения лазерного импульса (за мишень) могут проходить сквозь мишень и, преодолевая запирающий кулоновский барьер некомпенсированного положительного заряда ионов, улетать от мишени, тем самым заряжая ее. Вылет пучка релятивистских электронов из металлической/плазменной мишени с высокой диэлектрической проницаемостью приводит к генерации низкочастотного переходного когерентного излучения, объемного и поверхностного типов, в КВЧ и терагерцовой областях частот [3]. Формируемые пучки ускоренных ионов и квази-униполярные терагерцовые импульсы имеют интересные практические применения, что безусловно представляет интерес для экспериментальных исследований на установке ЭЛЬФ.

### *Список литературы*

1. Y. Sentoku, V.V. Bychenkov, K. Flippo, et al // Appl. Phys. B. 2002. V. 74. P. 207–215.
2. M. M. Günther, O. N. Rosmej, P. Tavana, et al // Nature Comm. 2022. V. 13. P. 170.
3. A. S. Kuratov, A. V. Brantov, V. F. Kovalev, V. Yu. Bychenkov // Phys Rev. E. 2022. V. 106. P. 035201.

С.И. ГЛАЗЫРИН, А.В. БРАНТОВ, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

*ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

## **ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УСТАНОВКЕ ЭЛЬФ**

Установка ЭЛЬФ по своим параметрам позволяет проводить эксперименты по изучению различных неустойчивостей в интересах задач лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и астрофизики. Для исследования предлагаются параметрические неустойчивости, возникающие в короне при взаимодействии мощных потоков лазерного излучения с плазмой, а также гидродинамические неустойчивости, влияющие на дальнейшую динамику мишеней. Энергетика в несколько килоджоулей доступна на ЭЛЬФ, хотя недостаточна для зажигания, даёт возможность воссоздать условия близкие к ЛТС при меньших затратах, что востребовано множеством исследовательских экспериментов. Будут представлены концепции постановок экспериментов, нацеленных на изучение физических эффектов, обусловленных параметрическими и потоковыми неустойчивостями.

S.I. GLAZYRIN, A.V. BRANTOV, V.YU. BYCHENKOV

*Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia*

*Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **EXPERIMENTAL PROPOSALS TO STUDY PARAMETRIC AND HYDRODYNAMIC INSTABILITIES AT THE ELF LASER FACILITY**

The ELF installation, due to its parameters, makes it possible to perform experiments to study various instabilities in the interests of laser thermonuclear fusion (ICF) and astrophysics. For research, we choose parametric instabilities that arise in the laser plasma corona during the interaction of powerful laser radiation with plasma, as well as hydrodynamic instabilities that affect the dynamics of the targets. The energy of several kilojoules available on ELF, although not sufficient for ignition, makes it possible to recreate conditions close to LTS at lower costs, that is in demand in many research experiments. Concepts for setting up experiments aimed at studying physical effects caused by parametric and flow instabilities will be presented.

Основным эффектом, определяющим поглощение лазерного излучения в широком диапазоне интенсивностей, является обратнотормозной механизм. Для мощных потоков лазерного излучения (на уровне  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> и выше) включаются аномальные поглощение и рассеяние, обусловленные параметрическими неустойчивостями, которые имеют пороги развития. Такие эффекты часто являются паразитными для лазерного термоядерного синтеза, т.к. приводят к росту отражённого и рассеянного излучения, снижая эффективность передачи энергии лазер-мишень. Также, плазменные волны, инициируемые такими неустойчивостями, приводят к аномальному поглощению, при котором значительная доля поглощенной энергии идет в быстрые электроны с энергией в десятки кэВ. Эти электроны распространяясь в мишени нежелательно предпрогревают её и нарушают баланс энергий, необходимый для эффективного сжатия в целях достижения зажигания. В этой связи важно уточнить пороги и эффективность развития параметрических неустойчивостей, что позволит более последовательно учитывать их эффекты при разработке перспективных мишеней для зажигания, а в дальнейшем отрабатывать методы контроля таких неустойчивостей. В докладе предлагаются постановки для исследования таких эффектов как вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), дуплазмонный распад (ДПР), вынужденное рассеяние Манделштама-Бриллюэна (ВРМБ) и параметрический распад (ПР). В экспериментах плоские мишени будут облучаться лазерным излучением с увеличивающейся интенсивностью, что позволит определить пороги включения различных параметрических неустойчивостей. Для диагностики необходимо отработать методы спектрального исследования рассеянного и отражённого излучения, а также потоков горячих электронов кэВ-ного диапазона. В дальнейших экспериментах облучение будет включать схему с пересечением лазерных лучей, в геометрии приближенной к экспериментам ЛТС. Неоднородности плазмы и лазерного излучения в области пересечения могут повлиять на пороги развития параметрических неустойчивостей, а также привести к перераспределению энергии между пучками, включая паразитное – выводящее энергию из системы, что важно контролировать в мишенях ЛТС.

Если развитие параметрических неустойчивостей определяет долю энергии, полученной мишенью, её внутренняя динамика может определяться гидродинамическими неустойчивостями. Для мишеней ЛТС неустойчивости нарушают сферическую симметрию, противодействуя зажиганию. В астрофизике гидродинамические неустойчивости играют важную роль во многих физических процессах (взрывы сверхновых, динамика остатков сверхновых, процессы формирования звёзд, т.п.). Как и в лазерных экспериментах, в астрофизических объектах излучение играет заметную роль в динамике плазмы. Соответственно, предлагаются постановки «астрофизика на столе» для изучения гидродинамических неустойчивостей и влияния на них эффектов переноса излучения.

Для изучения представленных выше эффектов необходимо развитие методов диагностики плазмы: её температуры, плотности. Такая диагностика, в частности, может быть основана на изучении спектров собственного свечения плазмы. Проработка таких спектральных методов может быть проведена совместно с исследованием радиационных свойств веществ, уточнением кинетических моделей ионизации и возбуждения высокозарядных ионов, а также применяться для тестирования радиационно-гидродинамических кодов.

Ф.А. КОРНЕЕВ, Н.Д. БУХАРСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ДИНАМИКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СВЕРХСИЛЬНЫХ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Обсуждается процесс генерации квазистационарного магнитного поля с помощью лазерно-разрядных схем при параметрах, соответствующих строящейся лазерной установке Эльф-МИФИ. Показано, что в рабочем диапазоне параметров характерные величины магнитных полей могут достигать сотен Тесла в зависимости от геометрических параметров мишеней. Рассмотрены возможные постановки экспериментов, направленных на исследование динамики плазмы в условиях высокой плотности энергии магнитного поля.

Ph.A. KORNEEV, N.D. BUKHARSKII

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **LASER PLASMA DYNAMICS IN SUPER-STRONG LASER-DRIVEN PULSED MAGNETIC FIELDS**

Generation of quasi-stationary magnetic fields with laser-driven discharge schemes is discussed for the parameters of the Elf-MEPHI laser facility, currently under construction. It is shown that in working parameter range characteristic magnetic fields amplitudes may reach hundreds of Tesla depending on geometrical properties of used targets. Possible experimental setups, aiming investigation of plasma dynamics with high magnetic field energy density are considered.

Высокие значения потока энергии, достижимые в современных источниках лазерного излучения, могут быть использованы для создания квазистационарных магнитных полей в области воздействия такого излучения на мишени специальной формы. Наиболее изученными на данный момент представляются разрядные схемы [1-5], в которых магнитное поле создается при возбуждении разрядных токов вдоль поверхности проводящей мишени. При этом существуют возможности создания таких полей в вакуумной области [3,4], а также создания горячей сильно-замагниченной плазмы [1,2,5]. Имеющиеся результаты, в том числе, экспериментальные [3-5], показывают, что для устойчивой генерации магнитных полей могут быть использованы мощные лазерные импульсы как суб-релятивистской [4], так и релятивистской [3,5] интенсивности, при этом достигаются эффективности порядка десяти процентов, а величины магнитных полей – сотен Тесла.

Возможность создания в лазерной лаборатории столь интенсивных магнитных полей заданной геометрии позволяет исследовать многочисленные процессы, характерные для, например, технологий управления и ускорения частиц, контроля и удержания горячей плотной плазмы, а также процессы, имеющие частичное астрофизическое подобие.

Наличие нескольких лазерных каналов с возможностью синхронизации, заложенной на этапе проектирования и строительства установки Эльф-МИФИ, существенно расширяет спектр возможных исследований. В частности, оказываются возможными реализации схем магнитной коллимации частиц, ускоренных с помощью высокоинтенсивного канала; распространение и взаимодействие потоков плазмы, сформированной под действием высокоэнергетичных нс импульсов в магнитных полях или с замагниченной плазмой, созданной в полостных мишенях в релятивистском пс режиме; эволюция горячих замагниченных плазменных потоков в вакуумном магнитном поле различной геометрии и др. Наличие синхронизированного высокоинтенсивного пс канала также принципиально для реализации протонной дефлектометрической диагностики, оказывающейся часто наиболее информативной при исследовании лазерно-индуцированных магнитных полей.

### *Список литературы*

1. Korneev Ph., D'Humières E., Tikhonchuk V. Gigagauss-scale quasistatic magnetic field generation in a snail-shaped target//Physical Review E, 2015, Vol. 91, No. 4, P. 43107.
2. Korneev P., Tikhonchuk V., D'Humières E. Magnetization of laser-produced plasma in a chiral hollow target//New Journal of Physics, 2017, Vol. 19, No. 3, P. 033023.
3. Kochetkov Iu.V., Bukharskii N.D., Ehret M., Abe Y., Law K.F.F., Ospina-Bohorquez V., Santos J.J., Fujioka S., Schaumann G., Zielbauer B., Kuznetsov A., Korneev Ph. Neural network analysis of quasistationary magnetic fields in microcoils driven by short laser pulses//Scientific Reports, 2022, Vol. 12, No. 1, P. 13734.
4. Santos J.J., Bailly-Grandvaux M., Ehret M., Arefiev A.V., Batani D., Beg F.N., Calisti A., Ferri S., Florido R., Forestier-Colleoni P., Fujioka S., Gigoso M.A., Giuffrida L., Gremillet L., Honrubia J.J., Kojima S., Korneev Ph., Law K.F.F., Marqués J.-R.R., Morace A., Mossé C., Peyrusse O., Rose S., Roth M., Sakata S., Schaumann G., Suzuki-Vidal F., Tikhonchuk V.T., Toncian T., Woolsey N., Zhang Z. Laser-driven strong magnetostatic fields with applications to charged beam transport and magnetized high energy-density physics//Physics of Plasmas, 2018, Vol. 25, No. 5, P. 1-11.
5. Ehret M., Kochetkov Yu., Abe Y., Law K.F.F., Bukharskii N., Stepanischev V., Fujioka S., d'Humières E., Zielbauer B., Bagnoud V., Schaumann G., Somekawa T., Roth M., Tikhonchuk V., Santos J.J., Korneev Ph. Kilotesta plasmoid formation by a trapped relativistic laser beam//Physical Review E, 2022, Vol. 106, No. 4, P. 045211.



А.П. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, В.Н. ДЕРКАЧ<sup>2</sup>, С.Г. ГАРАНИН<sup>2,1</sup>, В.В. КРАВЧЕНКО<sup>1</sup>, Ф.А. КОРНЕЕВ<sup>1</sup>, А.В. ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, А.В. МИХАЙЛЮК<sup>1</sup>, А.П. МЕЛЕХОВ<sup>1</sup>, А.А. СОЛОВЬЕВ<sup>3</sup>, И.Б. МУХИН<sup>3</sup>, С.А. ПИКУЗ<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

<sup>4</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

## **ФИЗИКА ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА НА ЛАЗЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ ЭЛЬФ: ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ПРОГРАММА И СТАТУС ПРОЕКТА**

В рамках работ по созданию многофункционального лазерного комплекса килоджоульного уровня энергии «ЭЛЬФ» предполагается разработка установки с регулируемыми временными, спектральными и энергетическими параметрами. Технические возможности лазерной установки, создаваемой в формате «user facility», позволят проводить эксперименты для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в области физики высокой плотности энергии и экстремального состояния вещества.

A.P. KUZNETSOV<sup>1</sup>, V.N. DERKACH<sup>2</sup>, S.G. GARANIN<sup>2,1</sup>, V.V. KRAVCHENKO<sup>1</sup>, P.A. KORNEEV<sup>1</sup>, A.V. LOBANOV<sup>1</sup>, A.V. MIKHAYLYUK<sup>1</sup>, A.P. MELEKHOV<sup>1</sup>, A.A. SOLOVIEV<sup>3</sup>, I.B. MUKHIN<sup>3</sup>, S.A. PIKUZ<sup>4,1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF), Sarov, Russia

<sup>3</sup>Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>4</sup>Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

## **THE ELF LASER FACILITY PROGRESS REPORT AND HIGH ENERGY DENSITY RESEARCH PROGRAM**

Within the creation of a multifunctional kilojoule laser complex "ELF" the development of laser setup with adjustable time, spectral and energy parameters is proposed. The laser setup creates in the "user facility" format, and it's technical capabilities will allow carrying out experiments on a wide range of fundamental and applied problems on a physics of high energy density and extreme state of matter area.

В настоящее время в мире постоянно расширяется фронт работ по созданию импульсных мощных лазерных установок, при фокусировке излучения которых достигаются плотности мощности, позволяющие создавать в веществе термодинамические состояния доступные в природе только в центрах массивных звезд. Эти установки позволяют проводить обширные экспериментальные исследования в области фундаментальных и прикладных задач в физике экстремального состояния вещества, лабораторной астрофизики, экспериментальных исследований в рамках работ по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС).

В НИЯУ МИФИ создается многофункциональный лазерный комплекс ЭЛЬФ (Экспериментальная Лазерно-Физическая установка). Заложенные в конструкцию лазера технические решения, в основу которых положена оригинальная схема усиления лазерного излучения в режиме двукратного насыщения при сохранении энергетической эффективности характерной для многопроходных лазерных систем обеспечивают: рост ключевых характеристик излучения - повышения энергии и снижения расходимости пучка. Одновременно предложенный подход уменьшает стоимость создания и эксплуатации установки, а также расширяет ее функциональные возможности, в том числе увеличивается частота проведения экспериментов.

Технические возможности комплекса позволят проводить экспериментальные исследования, недоступные для подавляющего большинства лазерных установок. Конструктивно МЛК ЭЛЬФ состоит из двух лазерных каналов с возможностью генерации в одном эксперименте двух управляемых по временной задержке импульсов излучения: наносекундного импульса с энергией до 7 кДж (длительность  $(1-10) \times 10^{-9}$  с) (плотность мощности на мишени до  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup>) и субпикосекундного импульса энергией до 300 Дж (длительность  $\sim 1,0 \times 10^{-12}$  с) (плотность мощности на мишени до  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>).

Лазерный комплекс создается в формате «user facility», с предоставлением «пучкового времени» пользователям из академического сообщества и позволит проводить эксперименты для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в области физики высокой плотности энергии и экстремального состояния вещества.

К.И. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, В.Н. ДЕРКАЧ<sup>2</sup>, М.С. ДУДАЛИН<sup>1</sup>, В.В. КРАВЧЕНКО<sup>1</sup>, А.П. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>,  
А.В.ЛОБАНОВ<sup>1</sup>, А.П. МЕЛЕХОВ<sup>1</sup>, А.В. МИХАЙЛЮК<sup>1</sup>, Д.Е. РАДЫГИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский федеральный ядерный центр — ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл., Россия

## СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОГО КОМПЛЕКСА “ЭЛЬФ”

Разработана система формирования опорного импульса и схема предварительного усиления наносекундного канала лазерного комплекса “ЭЛЬФ”. Осуществлён монтаж тракта предварительного усиления в соответствии с разработанной схемой.

K.I. VOLKOV<sup>1</sup>, V.N. DERKACH<sup>2</sup>, M.S. DUDALIN<sup>1</sup>, V.V. KRAVCHENKO<sup>1</sup>, A.P. KUZNETSOV<sup>1</sup>,  
A.V. LOBANOV<sup>1</sup>, A.P. MELEKHOV<sup>1</sup>, A.V. MIKHAYLYUK<sup>1</sup>, D.E. RADYGIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF), Sarov, Russia

## MASTER OSCILLATOR AND PRE-AMPLIFICATION PATH OF THE “ELF” LASER'S NANOSECOND CHANNEL

A reference pulse generating system and a scheme for pre-amplification of the “ELF” laser's nanosecond channel have been developed. The installation of the pre-amplification path was carried out in accordance with the developed scheme.

Лазерный комплекс ELF, создаваемый в настоящее время в НИЯУ МИФИ, включает в себя два лазерных канала с возможностью генерации в одном эксперименте двух управляемых по временной задержке импульсов излучения в наносекундном и субпикосекундном диапазоне длительностей.

Система формирования опорного излучения (СФОИ) предназначена для формирования первоначального лазерного импульса с требуемыми пространственными, временными, спектральными и энергетическими параметрами, подаваемого в силовой усилитель установки «ЭЛЬФ». СФОИ размещается на оптическом столе размером 6 x 1 м (рис. 1). Временные и спектральные параметры излучения формируются задающим генератором ЗГЛ, созданным на базе лазерного диода с центральной длиной волны излучения 1053 нм под управлением высокоскоростного драйвера Aerodiode Shaper, позволяющего управлять длительностью и формой лазерного импульса. Тракт предусиления, состоящий из регенеративного РУ усилителя [1] и 4-х проходного усилителя на базе квантрона K1 Nd:YLF с полупроводниковой накачкой предназначен для усиления импульса излучения задающего гетеролазера от энергии ~ 100 пДж до 50 мДж.

Дальнейшее усиление лазерного импульса строится по схеме прямого усиления на стержневых активных элементах: K2, K3 - Nd:YLF с полупроводниковой накачкой; K4, K5 - фосфатное стекло легированное Nd с ламповой накачкой. Для проектирования усилительного тракта было проведено моделирование оптической схемы в программном комплексе Zemax.

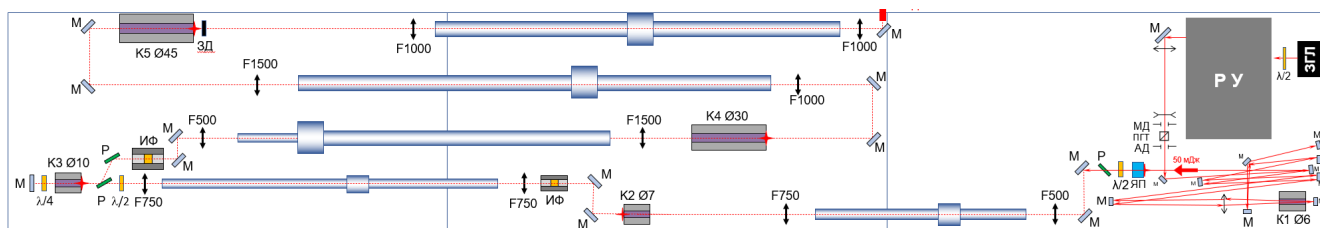


Рис. 1. Оптическая схема системы формирования опорного излучения

ЗГЛ – задающий гетеролазер; РУ – регенеративный усилитель; М – зеркала; МД – мягкая диафрагма; АД – апертурная диафрагма; ПТ – призма Глана-Тейлора; Р – поляризаторы; K1 – K5 – квантроны Ø активного элемента в мм, F – фокусные расстояния линз, ИФ – изолятор Фарадея, ЗД – зубчатая диафрагма. Звездочками указаны плоскости перестроения изображения.

В связи с конструктивной особенностью основного усилителя имеющего квадратное сечение оптического тракта размером 220 x 220 мм, после последнего каскада усиления K4 применена система аподизации, состоящая из квадратной зубчатой диафрагмы ЗД [2] (30x30 мм) и пространственного фильтра ПФ5. Это позволяет сформировать пучок с высоким (до 0,87) коэффициентом заполнения и минимальной (<1%) неоднородностью интенсивности по апертуре.

Расчётная энергия на выходе системы предварительного усиления составит 10 Дж, и является оптимальной для дальнейшего усиления в основном усилителе для получения на выходе из него лазерного пучка энергией до 7 кДж.

### Список литературы

1. Патент RU2618498 C2, опубл. 02.03.2021 Бюл.№7/ Кузнецов И.И., Мухин И.Б. с соавт.
2. Зубчатые аподизирующие диафрагмы с высокой лучевой прочностью / С. А. Бельков, И. Н. Воронич, С. Г. Гаранин, Б. Г. Зималин // Оптический журнал. – 2016. – №2

С.С. МАКАРОВ, С.Н. РЯЗАНЦЕВ, И.Ю. СКОБЕЛЕВ, М.А. АЛХИМОВА, М.В. СЕДОВ, С.А. ПИКУЗ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), Москва, Россия*

## **ВОЗМОЖНЫЕ ПОСТАНОВКИ ЛАБОРАТОРНО-АСТРОФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ЭЛЬФ»**

Рассмотрены постановки современного лабораторно-астрофизического эксперимента возможные для реализации на одноканальных наносекундных лазерных установка кДж уровня энергетики, а также их потенциальные расширения, предполагающие наличие второго лазерного канала пикосекундной длительности. Приведены схемы и описана совокупность диагностического оборудования необходимого для проведения экспериментальных исследований по следующим направлениям: динамика разлета и плазменная кинетика лазерно-индуцированной плазмы с астрофизическим подобием, генерация замагниченной высокотемпературной плазмы и создание в вакууме магнитных полей с высоким значением индукции, магнитное перезамыкание, а также распространение лазерно-индуцированных ударных волн и развитие различного рода гидродинамических неустойчивостей в низкоплотных средах, моделирующих межзвёздный газ.

S.S. MAKAROV, S.N. RYAZANTSEV, S.A. PIKUZ

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, Russia*

## **POSSIBLE SET-UPS FOR THE LABORATORY ASTROPHYSICS EXPERIMENT AT THE "ELF" LASER FACILITY**

Modern laboratory astrophysics experimental setups that can be implemented with single-channel nanosecond laser facilities of multi-kJ energy level and their possible extensions in the presence of a second laser channel of picosecond duration are considered. The schemes and all the diagnostic equipment required for carrying out experimental studies in the following fields are described: expansion dynamics and plasma kinetics of astrophysically relevant laser-produced plasma, generation of magnetized high-temperature plasma and high-induction magnetic fields in vacuum, magnetic reconnection, propagation of laser-induced shock waves and development of various types of hydrodynamic instabilities in low-density media considered as model of interstellar gas.

В качестве одного из основных пунктов экспериментальной программы установки «ЭЛЬФ» предлагается совокупность работ по лабораторному моделированию астрофизических объектов и явлений. В первую очередь речь идет о реализации экспериментальных постановок по лазерному динамическому сжатию материалов, которое в настоящее время является уникальным инструментом для построения уравнений состояния веществ и фазовых диаграмм в условиях сверхвысоких давлений и температур. Оптические лазеры с энергетикой менее 100 Дж уже позволили изучить фазовые диаграммы высокого давления алмаза, кварца, железа, висмута и многих других, в основном вдоль кривой ударной адиабаты Гюгонио. Энергетика наносекундного канала установки «ЭЛЬФ» (более кДж) позволит сжимать образцы до давлений, превышающих 1 ТПа, ожидаемых например в ядрах планет гигантов (Сатурн и Нептун ~ 1 ТПа, Юпитер ~ 4 ТПа, более массивные экзопланеты вплоть до 10 ТПа), и значительно расширить исследуемые диапазоны давлений и температур твердых веществ за пределы Гюгониоты.

Другим направлением лабораторно-астрофизического моделирования являются эксперименты по генерации потоков сильнозамагниченной плазмы и их взаимодействию с различными тестовыми объектами, например, газовыми потоками или твердотельными препятствиями, либо друг с другом. Такой тип экспериментов, в частности, представляет интерес с точки зрения определения механизмов, ответственных за ускорение частиц, наблюдаемых в космических лучах. Они могут быть обусловлены явлением магнитного перезамыкания, либо процессами, происходящими при распространении в плазме бесстолкновительных ударных волн, например, развитием неустойчивостей вейбелевского типа. Наличие на установке пикосекундного канала, синхронизированного с наносекундным, позволяет проводить на установке эксперименты, предполагающие визуализацию распространения в лазерно-индуцированных ударных волн и развития гидродинамических неустойчивостей методом фазово-контрастной радиографии. Помимо этого, пикосекундный канал может быть использован для создания источника для протонной радиографии необходимого для характеристики магнитных полей, генерируемых в области лазерно-плазменного взаимодействия.

В рамках проведения тестовых экспериментов наносекундный канал установки «ЭЛЬФ» может быть использован для прецизионного измерения (до 0.1 мÅ) длин волн спектральных линий *Li*- и *He*-подобных многозарядных ионов с помощью рентгеноспектральной диагностики на основе фокусирующих спектрометров с пространственным разрешением со сферически изогнутым кристаллами ( $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^4$  при ширине диапазона регистрации в 1–2 Å). Для этого воздействию генерируемого установкой лазерного импульса следует подвергать многокомпонентные твердотельные мишени, содержащие одновременно элементы с низким ( $Z \sim 10$ –20) и высоким ( $Z \sim 20$ –40) зарядом атомного ядра. Такой подход был апробирован на установке субкиловольтной энергетики для измерения длин волн линий *Li*- и *He*-подобных ионов с  $Z \sim 20$ . Использование установки «ЭЛЬФ» позволит проводить измерения для многозарядных ионов с зарядом ядра вплоть до  $Z \sim 40$ .

## О НЕКОТОРЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЛАЗЕРНОМ КОМПЛЕКСЕ «ЭЛЬФ»

guskovsky@lebedev.ru

Важнейшим направлением научной программы представляются исследования физики лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и уравнения состояния вещества (УРС) с использованием наносекундного лазерного импульса установки ЭЛЬФ с длиной волны 2-й гармоники излучения в координации с программой работ на установке МИК (ИЛФМ, РФЯЦ-ВНИИЭФ).

К наиболее важным разделам исследований относятся:

- эффективность поглощения энергии наносекундного импульса излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$  -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> в твёрдой мишени (СН, Ве, углерод повышенной плотности) и в малоплотном микроразмерном пористом веществе с близким химическим составом;

- плазменные неустойчивости и генерация быстрых электронов при воздействии импульса излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$ -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> на твёрдую мишень (СН, Ве, углерод повышенной плотности) и на малоплотное микроразмерное пористое вещество с близким химическим составом;

- перенос энергии быстрыми электронами, образованными при воздействии импульса излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$ -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> на твёрдую мишень (СН, Ве, углерод повышенной плотности) и на малоплотное микроразмерное пористое вещество с близким химическим составом;

- гидродинамические неустойчивости при воздействии импульса излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$ -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> на твёрдую мишень (СН, Ве, углерод повышенной плотности) и методы снижения инкрементов гидродинамических неустойчивостей, в частности, за счёт использования малоплотного поглотителя энергии лазерного импульса в виде малоплотного пористого вещества лёгких химических элементов;

- перенос энергии и передача давления твёрдому веществу при поглощении наносекундного импульса излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$  -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> в микроразмерном, объёмно структурированном веществе с докритической и сверхкритической плотностью (пористое вещество, регулярные структуры);

- лазерно-индуцированное рентгеновское излучение, применительно к непрямому облучению мишеней ЛТС искрового зажигания импульсом излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$  -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> в открытой геометрии облучения - лазерный пучок и плоская мишень – с использованием (1) мишени, содержащая тяжёлые вещества (Au, обеднённый уран, и др.), (2) мишени в виде слоя тяжёлого вещества, покрытой со стороны поверхности облучения слоем малоплотного пористого вещества лёгких химических элементов, (3) мишени в виде слоя микроразмерного пористого вещества лёгких элементов, содержащего добавки тяжёлых элементов с весовой долей 20-40 %, (4) мишени в виде регулярных микроразмерных структур тяжёлого вещества;

- исследование лазерно-индуцированного рентгеновское излучение, применительно к непрямому облучению мишеней ЛТС искрового зажигания импульсом излучения 2-ой гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$  -  $10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup> в закрытой геометрии при фокусировке лазерного пучка внутрь конвертора-бокса;

- ударные волны с давления в несколько Мбар, образованные при столкновении с массивной стенкой макрочастицы, ускоренной под действием импульса лазерного или лазерно-индуцированного излучения;

- физика быстрого зажигания мишени ЛТС - взаимодействие пучков лазерно-ускоренных быстрых электронов и ионов (пикосекундный импульс с интенсивностью  $10^{18}$  -  $10^{19}$  Вт/см<sup>2</sup>) с предварительно сжатым веществом (наносекундный импульс) - с использование пикосекундного импульса установки ЭЛЬФ;

- генерация сверхмощных ударных волн с гигабарным давлением при нагреве вещества пучками электронов, ускоренными пикосекундным импульсом с интенсивностью, превышающей  $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> с использование пикосекундного импульса установки ЭЛЬФ.

**Секция  
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор  
Кудряшов Николай Алексеевич

Секретарь секции

– инженер  
Нифонтов Даниил Романович

E-mail: [DRNifontov@mephi.ru](mailto:DRNifontov@mephi.ru)

А.Р. КАРИМОВ, М.А. СОЛОМАТИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ, НЕРАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ В SIER МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭПИДЕМИЙ**

В работе обсуждается образование нестационарных, нелинейных состояний в стандартной SIER модели распространения эпидемий для популяции постоянной численности в предположении равенства скорости выздоровевших и заболевших. Также считаются постоянными вероятности передачи инфекций, характерные времена развития болезни и выздоровления. Полученные аналитические соотношения используются для установления допустимой области управляющих параметров, обеспечивающих образование и существование неравновесных распределений, которые можно трактовать как латентную эпидемиологическую фазу.

A.R. KARIMOV, M.A. SOLOMATIN

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **QUASISTATIONARY, NON-EQUILIBRIUM STATES IN THE SIER MODEL OF EPIDEMIC SPREAD**

The formation of non-stationary, nonlinear states in the standard SIER model of epidemic spread for a population of constant size is discussed in the paper, assuming equal rates of recovery and infection. The probabilities of infection transmission, characteristic disease development and recovery times are also considered constant. The obtained analytical relationships are used to establish the permissible range of control parameters that ensure the formation and existence of non-equilibrium distributions, which can be interpreted as a latent epidemiological phase.

В настоящей работе, используя стандартную SIER модель распространения эпидемий [1-3], обсуждается установление динамического равновесия между заболевшими и выздоровевшими в популяции постоянной численности, когда следует учитывать скрытую фазу болезни, во время которой человек уже являясь носителем вируса, но еще не стал больным. Само существование такой промежуточной фазы определяет развитие или затухание заболевания во всей популяции. Однако, реализация конкретного сценария эпидемии задается соотношением между константами скоростей соответствующих эпидемиологических переходов, что является ключевым моментом для развития эпидемий.

Очевидно, что данные управляющие параметры зависят как от медико-биологических особенностей отдельных людей, так и физических и социальных условий, в которых находится популяция. Другими словами говоря, необходим учет процессов совершенно разного пространственно-временного масштаба и природы. Учитывая сложность такой задачи, в большинстве исследований эпидемиологические константы полагаются постоянными, их величина находится из анализа соответствующих эмпирических данных для конкретного случая [2-4]. По-видимому, именно этот момент и ограничивает прогностическую ценность подобных моделей.

Поэтому было бы интересно подойти к определению эпидемиологических констант из некоторых общих физико-химических соображений. Так, формальная близость уравнений SIER модели и химической кинетики наводит на мысль использовать для этого концепцию квазиравновесия, развитую для сложных реакций, характеризующихся разными временами установления равновесия [5]. В масштабах относительно медленных реакций можно заменить часть дифференциальных уравнений на алгебраические соотношения равновесия между концентрациями компонент наиболее быстрых процессов. Такой подход позволяет установить связь между скоростями для компонент и сделать заключение о соответствующих константах вблизи равновесных состояний. Однако, в отличие от химической кинетики, где рассматриваются процессы одинаковой физической природы, здесь мы имеем дело с процессами совершенно разного происхождения.

Именно эта особенность позволяет отделить процессы чисто биологического происхождения от процессов, непосредственно связанных с переносом инфекции в популяции. Положив скорости заболевания равными скорости выздоровления, получаем ситуацию, когда происходит перенос инфекции между здоровыми людьми и носителями скрытой фазы. К тому же, оказалось, что данный частный случай циркуляции инфекции внутри популяции допускает полностью аналитическое описание. Проанализировав полученные соотношения, мы определяем допустимый диапазон эпидемиологических констант, при которых происходит сохранение вируса в популяции, но нет эпидемии.

### *Список литературы*

1. Brauer, F., Castillo-Chavez, C. and Castillo-Chavez, C. *Mathematical models in population biology and epidemiology* (New York: Springer, 2012).
2. Li M. Y. et al. Global dynamics of a SEIR model with varying total population size // *Mathematical biosciences*. – 1999. – Т. 160. – №. 2. – С. 191-213.
3. Hethcote H. W. The mathematics of infectious diseases // *SIAM review*. – 2000. – Т. 42. – №. 4. – С. 599-653.
4. Leonov A., Nagornov O., Tyufin S. Modeling of Mechanisms of Wave Formation for COVID-19 Epidemic // *Mathematics*. – 2022. – Т. 11. – №. 1. – С. 167.
5. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. *Курс химической кинетики* (Москва: Высшая школа, 1984).

## ПРИНЦИП СТРУКТУРНОЙ АНАЛОГИИ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Рассматриваются нелинейные уравнения математической физики с запаздыванием. Показано, что точные решения таких уравнений можно получать на основе точных решений более простых уравнений без запаздывания.

V.G. SOROKIN

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia*

### PRINCIPLE OF STRUCTURAL ANALOGY OF SOLUTIONS TO NONLINEAR EQUATIONS OF MATHEMATICAL PHYSICS WITH DELAY

Nonlinear equations of mathematical physics with delay are considered. It is shown that exact solutions of such equations can be obtained based on exact solutions of simpler equations without delay.

Термин «точное решение нелинейного уравнения математической физики с запаздыванием» применяется, когда решение выражается в элементарных функциях, через определенные или неопределенные интегралы, через более простые уравнения (уравнения математической физики без запаздывания, ОДУ с запаздыванием или без него).

Принцип структурной аналогии решений позволяет строить точные решения нелинейных уравнений математической физики с запаздыванием на основе точных решений более простых уравнений без запаздывания [1, 2].

Например, рассмотрим нелинейное реакционно-диффузионное уравнение с запаздыванием:

$$u_t = au_{xx} + u(b \ln w + c), \quad w = u(x, t - \tau), \quad (1)$$

где  $u = u(x, t)$  – искомая функция,  $\tau > 0$  – постоянное время запаздывания,  $a, b, c$  – положительные константы. Уравнению (1) соответствует нелинейное реакционно-диффузионное уравнение без запаздывания (при  $\tau = 0$ ):

$$u_t = au_{xx} + u(b \ln u + c). \quad (2)$$

Уравнение (2) допускает точное решение с функциональным разделением переменных [3]:

$$u = \exp[\psi_2(t)x^2 + \psi_1(t)x + \psi_0(t)]. \quad (3)$$

где  $\psi_0(t), \psi_1(t), \psi_2(t)$  – функции, которые описываются системой ОДУ. Исходя из принципа структурной аналогии решений, будем искать точное решение уравнения с запаздыванием (1) в виде (3). После подстановки (3) в (1) получаем систему ОДУ с запаздыванием для функций  $\psi_0(t), \psi_1(t), \psi_2(t)$ :

$$\psi_0' = a(\psi_1^2 + 2\psi_2) + b\bar{\psi}_0 + c, \quad \bar{\psi}_0 = \psi_0(t - \tau), \quad (4)$$

$$\psi_1' = 4a\psi_1\psi_2 + b\bar{\psi}_1, \quad \bar{\psi}_1 = \psi_1(t - \tau), \quad (5)$$

$$\psi_2' = 4a\psi_2^2 + b\bar{\psi}_2, \quad \bar{\psi}_2 = \psi_2(t - \tau). \quad (6)$$

Таким образом, нелинейное уравнение с запаздыванием (1) имеет точное решение вида (3), где функции  $\psi_0(t), \psi_1(t), \psi_2(t)$  определяются из системы ОДУ с запаздыванием (4)–(6). ОДУ с запаздыванием (6) является независимым; его частное решение имеет вид  $\psi_2(t) = -\frac{b}{4a}$ . Далее последовательно ищем частные решения сначала ОДУ (5), а затем ОДУ (4) в виде экспонент:  $\psi_1(t) = Ae^{\lambda t}$ ,  $\psi_0(t) = \beta e^{2\lambda t} + \gamma$ , где  $A$  – произвольная постоянная, а значения констант  $\lambda, \beta, \gamma$  подлежат определению.

Принцип структурной аналогии решений применим и для более сложных уравнений математической физики с пропорциональным запаздыванием и переменным запаздыванием общего вида [4, 5].

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500440-9).

#### Список литературы

1. Полянин А.Д., Сорокин В.Г. Построение точных решений нелинейных уравнений математической физики с запаздыванием с помощью решений более простых уравнений без запаздывания // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2020. Т. 9. № 2. С. 115–128.
2. Полянин А.Д., Сорокин В.Г., Журов А.И. Дифференциальные уравнения с запаздыванием: свойства, методы, решения и модели. М.: Издательство «ИПМех РАН». 2022.
3. Полянин А.Д., Зайцев В.Ф. Справочник по нелинейным уравнениям математической физики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
4. Polyaniin A.D., Sorokin V.G. Reductions and exact solutions of nonlinear wave-type PDEs with proportional and more complex delays // Mathematics. 2023. V. 11. 516.
5. Polyaniin A.D., Sorokin V.G. Exact solutions of reaction–diffusion PDEs with anisotropic time delay // Mathematics. 2023. V. 11. 3111.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОГО ЛИТИЯ В ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСХОДАХ

Проведено моделирование процесса течения жидкого лития по поверхности макета приемной пластины лимитера в ПО ANSYS CFX. В качестве материала обеспечивающего высокую смачиваемость и выстилающего основную поверхность макета используется наборная структура из вольфрама, в расчёте используется модель пористого материала. Проведено сравнение полученных результатов моделирования и качественная оценка влияния расхода на наличие застойных зон и распределение температуры с учётом принятых допущений.

G.Y. STANISHEVSKIY, A.A. PISAREV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

### MODELING AND COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROCESS OF DISTRIBUTION OF LIQUID LITHIUM IN A POROUS STRUCTURE AT VARIOUS EXPENSES

Modeling of the flow process of liquid lithium on the surface of a mock-up receiving plate of a limiter in ANSYS CFX software was carried out. A set structure of tungsten, which provides high wettability and lines the main surface of the mock-up, is used as the material. The model of a porous material is used in the calculation. A comparison of the results obtained from modeling was carried out, and a qualitative assessment of the influence of flow rate on the presence of stagnant zones and temperature distribution was made, taking into account the accepted assumptions.

Один из основных вопросов, стоящих перед разработчиками установок управляемого термоядерного синтеза (УТС), в настоящее время является устойчивость материалов узлов установки обращённых и взаимодействующих с плазмой, подвергающихся значительным тепловым нагрузкам. Существует несколько подходов к обеспечению возможной долговременной эксплуатации таких элементов. Один из них, использование жидких металлов в качестве материала, непосредственно контактирующего с плазмой, в частности жидкого лития [1-3].

В работе представлены результаты моделирования растекания жидкого лития, сквозь предварительно смоченный пакет вольфрамовых сеток толщиной 1 мм с характерным размером ячейки 0,1мм. В процессе моделирования использовались следующие граничные условия и допущения: поверхность, на которой размещается пакет, подогрет до температуры 300°C, макет располагается в разреженной атмосфере (0 Па, учёт реакций химического окисления на поверхности жидкотекучего слоя лития исключён), используется

модель изотропного пористого материала, рассматривается 4 варианта скорости подачи жидкого лития 2,3,4,5 г/сек.

По результатам моделирования были получены картины полей скоростей и температур. При их рассмотрении можно сделать вывод о наличии неравномерного распределения потока в зоне диспенсера, предкамера, непосредственно находящаяся у вершины пакета. С увеличением расхода, в теле пакета вольфрамовых сеток наблюдаются рост участков с градиентом скоростей течения лития, что в свою очередь может привести к неравномерному съему поступающего тепла от плазмы, как следствие возможно появление зон локального перегрева поверхности.

Необходимо отметить, что в рамках работы была предпринята попытка прямого моделирования сетчатой пристеночного слоя у каждого из ребер сетки, разрешить данную постановку не представлялось

структуры, повторяющей используемый материал на установке. В связи со сложностью «описания» возможном, поэтому использовалась эквивалентная постановка с моделью пористого тела. Было также установлено, что результаты численного моделирования сильно зависят от используемых характеристик пористого тела и для получения корректного результата, необходимо дополнительно верифицировать параметры распространения лития в пакете вольфрамовых сеток.

#### Список литературы

1. Мирнов С.В., Евтихин В.А. Применение Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т-3М и Т-11М // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2005. Вып. 4. С. 3-18.
2. Experimental and calculated basis of the lithium capillary system as divertor material / N.V. Antonov [et. al.] // J. Nucl. Mater. 1997. V. 241-243. P. 1190-1196.
3. Писарев А.А. и др. ТЕКУЩИЙ ЖИДКИЙ ЛИТИЙ КАК МАТЕРИАЛ, ОБРАЩЁННЫЙ К ПЛАЗМЕВАНТ // ВАНТ Сер. Термоядерный синтез. – 2024. – Т. 47, – №. 1 – С. 15-28.

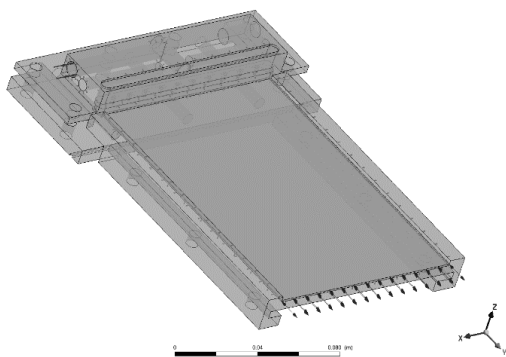


Рис. 1. Модель приемной пластины лимитера



Д.Е. СТОВПЕЦ, А.Я. ПАК, Г.А. БЛЕЙХЕР

*Национальный исследовательский томский политехнический университет, Томск, Россия*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ТИГЛЕ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ СИНТЕЗЕ ВЕЩЕСТВ

Рассмотрена возможность моделирования температурных полей в графитовом тигле при воздействии на него дуговым разрядом. Процесс воздействия дуги на тигель задавался с помощью теплового потока, проходящего через поверхность тигля. Расчёт модели проводился в “Comsol Multiphysics”, с использованием уравнения теплопроводности и заданных граничных условий.

D.E. STOVPEETS, A.Y. PAK, G.A. BLEYKHER  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia*

## MODELING THE PROPAGATION OF TEMPERATURE FIELDS IN A CRUCIBLE DURING THE ELECTRIC ARC SYNTHESIS

The possibility of modeling temperature fields in a graphite crucible when exposed to an arc discharge is considered. The process of arc action on the crucible was set using a heat flow passing through the surface of the crucible. The model was calculated in Comsol Multiphysics using the thermal conductivity equation and the specified boundary conditions.

С каждым годом возрастает спрос на материалы различных видов. Сплавы бора и углерода с некоторыми металлами (Ti, Cr, Si, Mo и т.п.) обладают уникальными свойствами, что определяет их применение во многих отраслях современной промышленности.

Существует множество различных способов получения карбидов и боридов металлов. Одним из перспективных способов является безвакуумный электродуговой синтез [1]. Основными преимуществами данного метода синтеза можно назвать возможность его реализации в открытой воздушной среде, а также небольшое время его реализации.

Каждому синтезируемому веществу соответствуют собственные мощностные параметры реактора, такие как сила тока, напряжение и время работы, при которых оно было получено. Набор параметров, соответствующих минимальному потреблению энергии при котором возможен синтез вещества, называется оптимальным. Поиск оптимальных параметров синтеза требует проведения большего количества экспериментов.

Возможным способом сокращения числа экспериментов является построение математической модели системы, которая будет демонстрировать распространение температурных полей в тигле в процессе работы установки в зависимости от прилагаемой мощности. Расчёт созданной модели производился “Comsol Multiphysics”.

В разработанной модели воздействие дугового разряда на графитовый тигель было упрощено до простого проходящего через поверхность тигля теплового потока. Взаимодействие тигля с тепловым потоком описывалось уравнением теплопроводности и соответствующими начальными и граничными условиями.

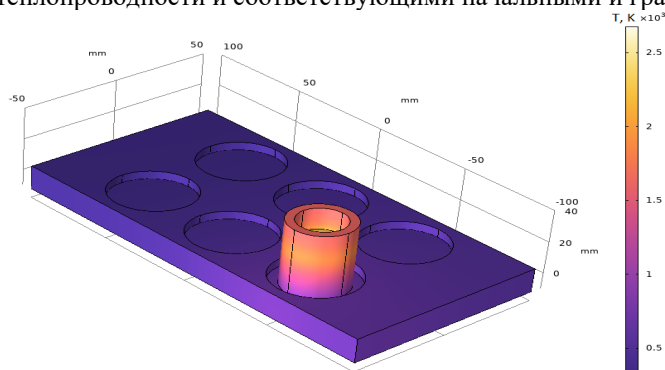


Рис. 1. Результат расчёта распределения температуры в системе

Далее проводилось сравнение с измеренными в процессе эксперимента температурами. Результаты расчёта и измерений согласуются.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2022-0018).

### Список литературы

1. Васильева Ю.З., Пак А.Я. Синтез карбида молибдена в самоэкранирующейся электродуговой плазме // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 62–72. DOI: 10.18721/JEST.27205

**ГЕНЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КАНАЛЬНОГО РАДИАТОРА**

В работе была оптимизирована топология канального радиатора системы охлаждения процессора. Для этого была создана базовая геометрия с использованием платформы SALOME. Затем с использованием пакета OpenFOAM были оценены параметры каждой конструкции, после чего был применен алгоритм оптимизации. В исследовании было проведено сравнение алгоритмов: генетический алгоритм и градиентный алгоритм оптимизации. В качестве целевой функции была использована функция, которая включает в себя общую теплопередачу и перепад давления. Входными параметрами были значения заполнения доменов, причем каждая новая геометрия генерировалась автоматически с использованием Python скрипта.

A.I. YESIS, M.A. CHMIKHOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia***GENERATIVE OPTIMIZATION OF DUCT RADIATOR TOPOLOGY**

A The topology of the channel radiator in the CPU cooling system was optimized in the study. To achieve this, a base geometry was created using the SALOME platform. Subsequently, the OpenFOAM package was employed to assess the parameters of each design, followed by the application of an optimization algorithm. Two algorithms were utilized in this task: a genetic algorithm and a gradient-based optimization algorithm. A comparison between these algorithms was also conducted. The objective function employed in the study included both overall heat transfer and pressure drop. The input parameters consisted of domain fill values, and each new geometry was automatically generated using a Python script.

Актуальность задачи компактного охлаждения связана с увеличением мощности вычислительных систем, развитием электромобилей [1] и стремлению к энергосбережению. Неэффективное решение проблемы теплоотвода может привести к перегреву, снижению производительности и даже повреждению техники. Целью исследования является разработка и оптимизация геометрии радиатора для водяной системы охлаждения процессора с использованием вычислительной гидродинамики. Первым этапом было создание геометрии и расчетной сетки в графическом интерфейсе SALOME [2]. По полученной сетки проводилось численное моделирование с использованием пакета OpenFOAM и решателя chtMultiRegionFoam [3]. В качестве целевой функции была использована функция, которая включает в себя общую теплопередачу и перепад давления [4]. Входными параметрами были значения заполнения доменов, причем каждая новая геометрия генерировалась автоматически с использованием Python скрипта. Для решения задачи оптимизации были выбраны два алгоритма: эволюционный и градиентный. В качестве градиентного метода был использован BFGS [5]. В ходе работы получено, что генетический алгоритм справляется с глобальной оптимизацией в многомерных пространствах параметров используя на 30-40% меньше итераций [6]. Исследование подтвердило, что оптимизация геометрии и параметров системы охлаждения повышает ее эффективность на 7-10% по сравнению с традиционной конструкцией, которая имеет линейное и шахматное расположение. В результате работы была оптимизирована топология канального радиатора системы охлаждения процессора.

*Список литературы*

1. Chen F., Wang J., Yang X. Topology optimization design and numerical analysis on cold plates for lithium-ion battery thermal management // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. (183). С. 122087.
2. Introduction to Salome Platform — GUI 9.5.0 documentation. URL: <https://docs.salome-platform.org/latest/gui/GUI/introduction.html>.
3. OpenFOAM: User Guide: chtMultiRegionFoam [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-heat-transfer-chtMultiRegionFoam.html> (дата обращения: 29.05.2023).
4. Mekki B. S., Langer J., Lynch S. Genetic algorithm based topology optimization of heat exchanger fins used in aerospace applications // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. (170). С. 121002.
5. Liu D. C., Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization // Mathematical Programming. 1989. № 1 (45). С. 503–528.
6. Чернышев Олег и Борисов Аркадий. Сравнительный анализ решения задач оптимизации генетическими и градиентными методами // Transport and Telecommunication. Рига, Латвия, 2007. Т. 8, № 1. С. 40–52.

V.C. POPOV<sup>1,2</sup>, D.V. KONDRATOV<sup>1,2,3</sup>, M.V. POPOVA<sup>1,3</sup>, T.S. KONDRATOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия*

<sup>2</sup>*Институт проблем точной механики и управления - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр*

*Российской академии наук», Саратов, Россия*

<sup>3</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

## **КОЛЕБАНИЯ СТЕНКИ, ИМЕЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНО-УПРУГИЙ ПОДВЕС И ОГРАНИЧИВАЮЩЕЙ ПУЛЬСИРУЮЩИЙ СЛОЙ ВЯЗКОГО ГАЗА**

Осуществлена постановка и решение задачи аэроупругих колебаний стенки, имеющей нелинейно-упругий подвес и образующей дно узкого плоского канала, заполненного вязким пульсирующим газом. Проведен асимптотический анализ задачи, в результате которого получено обобщенное уравнение Дуффинга. Решение данного уравнения проведено методом гармонического баланса, что позволило найти и исследовать основной аэроупругий и фазовый отклик рассматриваемой стенки.

V.S. POPOV<sup>1,2</sup>, D.V. KONDRATOV<sup>1,2,3</sup>, M.V. POPOVA<sup>1,3</sup>, T.S. KONDRATOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

<sup>2</sup>*The Institute for Precision Mechanics and Control Problems is a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Federal Research Center "Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Saratov, Russia*

<sup>3</sup>*Saratov State University, Saratov, Russia*

## **OSCILLATION OF A WALL HAVING A NONLINEAR ELASTIC SUSPENSION AND BOUNDING**

### **A PULSATING VISCOUS GAS LAYER**

The problem of aeroelastic oscillations for a wall having a nonlinear-elastic suspension and forming the bottom of a narrow plane channel filled with viscous pulsating gas was formulated and solved. An asymptotic analysis of the problem was carried out, as a result of which a generalized Duffing equation was obtained. The solution of this equation was carried out by the harmonic balance method, which allowed us to obtain and study the primary aeroelastic and phase response of the considered wall.

Рассмотрение взаимодействия вязкого газа с ограничивающей его стенкой на нелинейно упругом подвесе, сопряжено с постановкой нелинейной краевой задачи математической физики, а ее решение требует привлечения современных подходов исследования подобных проблем [1]. Данные задачи составляют одно из направлений аэрогидроупругости [2]. Ранее нами была рассмотрена задача гидроупругих колебаний торцевой стенки узкого канала на нелинейно упругом подвесе, взаимодействующей с несжимаемой вязкой жидкостью, заполняющей канал [3], а в [4] исследовано взаимодействие газа с жестким диском – затвором клапана как одномассовой модели линейного гармонического осциллятора. В настоящей работе рассмотрен узкий плоский канал с параллельными жесткими стенками. Верхняя стенка - неподвижна, а нижняя, имеет упругий подвес с жесткой кубической нелинейностью и может перемещаться в вертикальном направлении. Правый торец канала примыкает к торцевой полости, а на левом торце канала газ может свободно истекать в окружающее пространство. Торцевая полость, канал и окружающее пространство заполнены одним и тем же газом, давление в котором в невозмущенном состоянии постоянно. В возмущенном состоянии в торцевой полости возбуждается пульсация давления, в результате этого возникают нелинейные колебания стенки канала. Исследуются установившиеся вынужденные нелинейные колебания стенки за счет пульсации давления на торце. Динамика вязкого газа рассмотрена в рамках ползущего движения для модели баратропной среды при изотермическом ее состоянии. Исходная задача представляет собой систему двумерных уравнений Навье-Стокса для вязкого газа, замыкаемых уравнением неразрывности и уравнением баратропного состояния, а также уравнение одномассового осциллятора с кубической нелинейностью и возмущающей силой, определяемой давлением газа, заполняющим канал. Граничные условия: условия прилипания газа к ограничивающим его стенкам, а также условия совпадения давления на торцах канала с давлением в торцевой полости и окружающем пространстве. Введены в рассмотрение два малых параметра задачи: относительная толщина слоя газа в канале и относительная амплитуда колебаний стенки канала. Проведенный асимптотический анализ позволил получить линеаризованные уравнения динамики тонкого слоя вязкого газа. Их решение осуществлено методом итерации и получено выражение для давления газа через закон движения стенки канала. В результате получено обобщение уравнения Дуффинга для нелинейных аэроупругих колебаний стенки канала. Решение данного уравнения проведено методом гармонического баланса, что позволило получить выражения для основного аэроупругого и фазового отклика пластины в виде неявных функций. Проведено численное исследование данных откликов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00159.*

*Список литературы*

1. Кудряшов Н.А. Методы нелинейной математической физики. Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2010. 368 с.
2. Païdoussis M.P. // J. Fluids Struct. 2021. Vol. 107. Art. no. 103374.
3. Barulina M., Santo L., Popov V. and others // Mathematics. 2022. Vol. 10, art. no. 3844.
4. Raeder T., Mishchenkova O.V., Koroleva M.R. and others // Russian J. Nonlinear Dyn. 2021. Vol. 17. No. 1. P. 119-138.

А.В. ПОРУБОВ

*Институт Проблем Машинovedения, Санкт-Петербург, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАМАТЕРИАЛА НА ЛОКАЛИЗАЦИЮ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ**

Разработана асимптотическая процедура вывода модельных нелинейных уравнений деформации для ряда моделей метаматериала. Исследованы локализованные решения выведенных нелинейных уравнений. Показано, что генерация локализованных волн деформации может управляться особенностями внутренней структуры метаматериала.

A.V. PORUBOV

*Institute of Problems in Mechanical Engineering, Saint Petersburg, Russia*

## **INFLUENCE OF STRUCTURE OF A METAMATERIAL ON LOCALIZATION OF NONLINEAR STRAIN WAVES**

An asymptotic procedure is developed for obtaining model nonlinear strain equations for a number of metamaterial models. Localized solutions of the derived nonlinear equations are studied. It is shown that the generation of localized strain waves can be managed by the features of the internal structure of the metamaterial.

Нелинейные локализованные волны деформации представляют особый интерес для исследований, поскольку они могут переносить значительную энергию, и это важно для анализа деформационно-прочностных свойств. Возможность переноса энергии без потерь связана с воздействием не только нелинейности, но и дисперсии.

В метаматериалах свойства могут задаваться человеком. Представляет интерес исследование влияния характеристик метаматериала на нелинейно-упругие и дисперсионные свойства, влияющие на локализацию волны деформации конечной амплитуды.

Метаматериалы моделируются в дискретном приближении на основании разностных уравнений решетки, которые в нелинейном приближении не решаются аналитически. Поэтому для анализа удобно использовать континуальный предел, приводящий к связанным дифференциальным уравнениям в частных производных.

В данной работе асимптотически исследуется ряд цепочечных моделей метаматериала. В континуальном пределе используется асимптотическая процедура, позволяющая расщепить связанные нелинейные уравнения в частных производных и получить модельное уравнение для продольных волн деформации. Оказывается, что разные модели метаматериала приводят к функционально подобному модельному уравнению, однако различия в коэффициентах позволяют реализовать генерацию разных нелинейных локализованных волн. Установление связи между параметрами модели метаматериала и числом сгенерированных волн позволяет предложить управление нелинейно-упругими свойствами метаматериала для достижения требуемого характера локализации нелинейных волн деформации.

Предварительные результаты получены в работах [1,2].

### *Список литературы*

1. Alexey V. Porubov, Nonlinearity and Dispersion in Extended Mass-in-Mass Metamaterials In: H. Altenbach and V. Eremeyev (eds.), *Advances in Linear and Nonlinear Continuum and Structural Mechanics, Advanced Structured Materials* 198 (2023) pp. 369-384
2. Porubov A.V. // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 119 (2023) 107095.

О. РАЖАБОВ, С. МИРЗАЕВ, М. ЮСУПОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова, АН РУз, 100125 Ташкент, Узбекистан*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ОЧИСТКИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ СТОЧНЫХ ВОД ХОЛОДНОЙ АТМОСФЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ ЧЕРЕЗ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Неадекватное использование антибиотиков привело к значительному загрязнению окружающей среды и фармацевтических сточных вод, создавая угрозу для общественного здоровья. Данное исследование дает подробную атомарную информацию о разложении антибиотиков, вызванном холодной плазмой, что потенциально может повлиять на применение в очистке фармацевтических сточных вод.

O. RAJABOV, S. MIRZAEV, M. YUSUPOV

*Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, AS Uz, 100125, Tashkent, Uzbekistan*

## STUDY OF MECHANISMS OF PHARMACEUTICAL WASTEWATER TREATMENT BY COLD ATMOSPHERIC PLASMA THROUGH COMPUTER SIMULATIONS

The inappropriate use of antibiotics has resulted in significant contamination of the environment and pharmaceutical wastewater, posing a risk to public health. This study provides atomic-level insight into cold plasma-induced degradation of antibiotics, which could potentially impact applications in pharmaceutical wastewater treatment.

Холодная атмосферная плазма (ХАП) обеспечивает исключительно результативный, энергоэффективный и экологически чистый подход к деградации антибиотиков [1]. Несмотря на множество проведенных исследований в этой области [2,3], основные механизмы взаимодействия между ХАП и антибиотиками остаются неясными. Таким образом, основная цель данного исследования заключается в уточнении влияния активных форм кислорода (АФК), генерируемых ХАП, на антибиотики с помощью компьютерного моделирования. В частности, мы используем моделирование реактивной молекулярной динамики (МД) для изучения взаимодействия атома кислорода (ключевого компонента АФК) с молекулой офлоксацина (рис. 1), которая служит модельной системой в нашем моделировании.

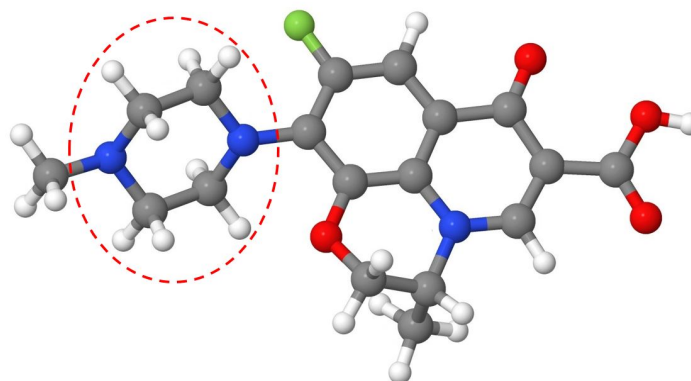


Рис. 1. Схематическое изображение молекулы офлоксацина. Кольцо пиперазина выделено красным пунктирным кружком, а атомы углерода, кислорода, азота, водорода и фтора представлены серым, красным, синим, белым и зеленым цветом соответственно.

Результаты моделирования показали, что взаимодействие атомов кислорода с офлоксацином приводит к разрушению пиперазинового кольца, а также к деметилированию в структуре. Более того, эти взаимодействия приводят к образованию молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а также к созданию спиртовых групп в структуре. Это исследование предоставляет детальные атомарные анализы процесса разложения антибиотиков под воздействием холодной плазмы, который может иметь значение для применения в очистке фармацевтических сточных вод.

### Список литературы

1. Nguyen P.T. and others // J. Chem. 2021. Vol. 2021, № 9981738, P. 1.
2. Wielogorska E. and others // Antibiotics 2023. Vol. 12, № 7. P. 1115.
3. Sarangapani C. and others // Sci. Rep. 2019. Vol. 9, P. 3955.

И.Г. РАЗЕНКОВ, М.А. ЧМЫХОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТОВ OPENFOAM И ЛОГОС, ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Были рассмотрены основные методы численного моделирования задачи Стефана. Проведено сравнение результатов расчета ЛОГОС-Тепло и решателя meltFOAM, использующего в своей основе базовый решатель buoyantFOAM. Были определены границы применимости каждого из решателей. Для одномерной задачи было также проведено сравнение с аналитическим решением.

I.G. RAZENKOV, M.A. CHMYKHOV

*NationalResearchNuclearUniversity MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## NUMERICAL SIMULATION OF STEFAN PROBLEM USING OPENFOAM AND LOGOS, VERIFICATION OF RESULTS

Some common methods for numerical simulation of the Stefan problem have been reviewed. The capabilities of LOGOS and OpenFOAM for modelling such problems have been discovered, their results have been compared. For 1D problem analytical solution was also presented.

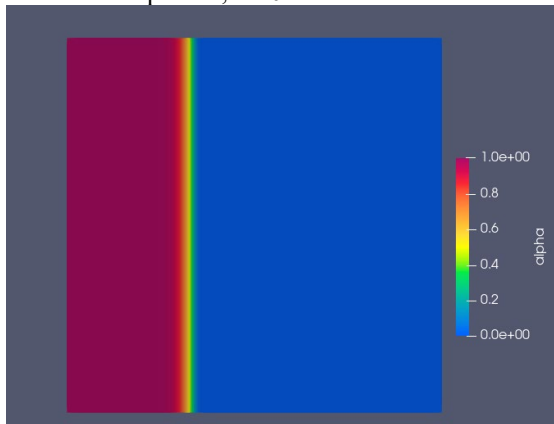
Задача Стефана представляет собой краевую задачу для дифференциального уравнения в частных производных с подвижной границей. Такие задачи возникают при рассмотрении фазовых переходов. Потребность в моделировании фазовых переходов довольно часто возникает в различных технических областях, например, при изучении процессов нагрева и плавления металлов в металлургии, при изучении процессов сварки и т.д. Интересным направлением также являются тепловые аккумуляторы, основанные на фазовом переходе.

Для моделирования фазовых переходов было разработано множество схем численного расчета. Они все подразделяются на две большие группы – методы сквозного счета и методы выделения границы. В данной работе мы даем общий обзор этих методов и рассматриваем более подробно те, которые используются в верифицируемых нами решателях.

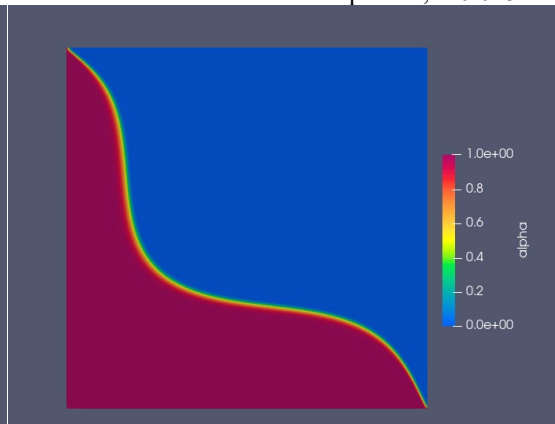
В работе приведены примеры нескольких одно- и двумерных нестационарных расчетов. Каждый был проведен на нескольких сетках для доказательства сеточной сходимости методов. Для одномерной задачи использовались равномерные сетки соответственно в 50, 100 и 200 ячеек, для двумерных – прямоугольные сетки 50x50, 100x100, 200x200 ячеек. Проведено сравнение результатов, вычислена разница между двумя решениями. Для одномерной задачи также вычислена разница с аналитическим решением. Сделаны выводы о хорошем совпадении результатов двух решателей.

Далее в качестве примера приведены результаты расчета в OpenFOAM на самой точной сетке из описанных выше.  $\alpha$  – это параметр, меняющийся от 0 до 1. В области твердого тела он равен 0, в области жидкости равен 1. Этот решатель также позволяет учитывать силу тяжести, но в данных тестах она была установлена равной нулю. В одномерной задаче на левой и правой границах установлены постоянные температуры. Изначально во всей области задана температура холодной стенки. Температура горячей стенки превышает температуру фазового перехода. В 2D расчете на всех границах также заданы постоянные температуры. Граница раздела фаз принимает в данном случае сложную форму, которую невозможно определить аналитическими методами. В работе, помимо коэффициента  $\alpha$ , приведены также графики зависимости температуры от координаты и времени.

1D расчет,  $t = 0.1$



2D расчет,  $t=0.025$



## БИОИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ СТРУКТУРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ГЕНОМА *C. MEROLAE*

Ранее разработанный IP-метод применялся для поиска дисперсных сильнодивергировавших повторов в геноме *C. merolae*. Было выделено 20 семейств дисперсных повторов, содержащих 33,938 повторов, длина которых варьирует от 108 до 600 н.п. Повторы покрывают более 72% генома. Предполагается, что повторы могут быть связаны с регуляцией активности генома.

V.M.RUDENKO, E.V.KOROTKOV

Research Center of Biotechnology of RAS, Moscow, Russia

### BIOINFORMATICS APPROACH TO THE STRUCTURAL ORGANIZATION STUDY OF THE *C.MEROLAE* GENOME

A previously developed IP-method was used to search for dispersed, highly divergent repeats in the *C. merolae* genome. 20 dispersed repeat families contain 33,938 repeats; the length of repeats varies from 108 to 600 bp. Repeats cover more than 72% of the *C. merolae* genome. We assume that they can play a significant role in regulating the activity of the genome.

Дисперсные повторы широко распространены в геномах эукариот. В большей степени они встречаются в межгенных областях, вследствие чего могут накапливать большое число мутаций. Существующие биоинформационные методы способны идентифицировать повторы, если число замен на один нуклеотид при сопоставлении копий повторов между собой, составляет  $x \leq 1.0$ . Ранее был разработан метод IP [1], способный определять повторы с  $x \leq 1.5$ . В данной работе он использовался для поиска дисперсных повторов в геноме примитивного эукариотического организма *Cyanidioschyzon merolae*. Это одноклеточная красная водоросль, обитающая в сернокислых горячих источниках. Геном содержит 20 хромосом, полная длина генома - 16,546,747 н.п.

Ключевая стадия IP-метода заключается в применении итерационной процедуры для генерации профиля семейства повторов. Профиль строится на основании множественного выравнивания последовательностей, по которому формируется семейство, и представляет собой позиционно-весовую матрицу. На следующем шаге профиль используется как весовая матрица в алгоритме локального выравнивания при сканировании геномной последовательности. Далее фрагменты ДНК, имеющие высокое значение статистической значимости, детектируются как повторы, принадлежащие семейству. Заключительной стадией алгоритма является фильтрация. Она проводится таким образом, что повторы одного семейства не имеют пересечений, а повторы разных семейства могут иметь пересечения, но их длина составляет не более 50 н.п.

В геноме *C. Merolae* мы определяли семейства повторов в пределах длины 600 н.п. Было выделено 20 семейств с FDR (false discovery rate) менее 4%. Для определения уровня FDR по каждому семейству проводился поиск повторов в реальной последовательности ДНК и случайной последовательности, полученной перемешиванием символов исходной. Статистически значимыми считались семейства в формировании которых участвовали не менее 300 фрагментов. Повторы, отвечающие различным семействам детектировались как на прямой, так и на обратной нити ДНК. Общее число повторов составило 33,938 н.п., средняя длина — 522 н.п. Повторы покрывают более 72% генома *C. Merolae*, они равномерно распределены по хромосомам.

Далее проводилось сравнение полученных данных с результатами аннотации генома *C. Merolae* с сайта <http://plants.ensembl.org>. Для нахождения дисперсных повторов там использовалось ПО RepeatMasker [2] и RED [3]. Применение этих программ позволило обнаружить 20,320 дисперсных повторов, покрытие генома — 28.09%. Однако характеристики аннотированных и найденных в данной работе повторов кардинально отличаются. Так, существующие методы позволяют находить сильноподобные короткие повторы, средняя длина повтора составляет 260 н.п. Мы также определяли пересечения между аннотированными повторами и повторами, найденными IP-методом. В некоторых случаях наблюдается сильная корреляция между аннотированными классами и определенными нами семействами.

Были получены консенсусы семейств повторов в символьном виде. Как правило консенсус семейства повтора представляет собой чередование высококонсервативных коротких участков с относительно случайными. Можно говорить даже не столько о повторах, сколько о структурной организации молекулы ДНК. Мы предполагаем, что более консервативные районы ответственны за связывание с определенными белками, такими как гистоны. Это позволяет клетке влиять на трансляцию конкретных белков в зависимости от условий внешней среды.

#### Список литературы

1. Korotkov E., Suvorova Y. and others // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol.24, 10964
2. RepeatMasker Home Page Available online: <http://www.repeatmasker.org/>
3. Girgis H.Z. // BMC Bioinformatics 2015. Vol.16, P.1-19

Е.А. ОВСЯННИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРУШЕНИЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ИЗ ТЕОРИИ ИОННО-ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ

Рассмотрена начально-краевая задача для «1+1»-мерного уравнения сферически симметричных ионно-звуковых волн в плазме. Эта задача сводится к эквивалентному интегральному уравнению. Методом сжимающих отображений доказывается локальная разрешимость данного уравнения. Далее используется «бутстэп»-метод повышения гладкости решения. Наконец, методом пробных функций доказывается результат о разрушении решения, а также находится верхняя оценка на время разрушения.

Е.А. OVSYANNIKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia  
<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## BLOW UP OF THE SOLUTION TO A NONLINEAR INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEM FROM THE THEORY OF ION ACOUSTIC WAVES IN A PLASMA

The initial-boundary value problem for the “1+1”-dimensional equation of spherically symmetric ion acoustic waves in a plasma is considered. This problem reduces to an equivalent integral equation. The local solvability of this equation is proved by the contracting mapping method. Next, the “bootstep” method is used to increase the solution’s smoothness. Finally, using the method of test functions, the result about the solution’s blow up is proved, and an upper estimate for the blow up time is also found.

Данная работа продолжает исследования, начатые в статьях [1] – [5]. Основным объектом исследования является «1+1»-мерная начально-краевая задача о сферически симметричных ионно-звуковых волнах в ионно-электронной плазме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\Delta_r u(r, t) - u(r, t)) + \omega^2 \Delta_r u(r, t) &= \frac{\partial^2 u^2(r, t)}{\partial t^2}, \quad (r, t) \in [a, b] \times [0, T], \\ u(r, 0) &= u_0(r), \quad u_t(r, 0) = u_1(r), \quad r \in [a, b], \\ u_r(a, t) &= u_r(b, t) = 0, \quad t \in [0, T], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $0 < a < b$ ,  $0 < T < +\infty$ ,  $\omega > 0$  – плазменная частота электронов, а  $\Delta_r$  – радиальная часть оператора Лапласа. Незвестная функция  $u(r, t)$  пропорциональна потенциалу  $\varphi(r, t)$  электрического поля в плазме. Отметим, что уравнение задачи (1) относится к нелинейным уравнениям соболевского типа и содержит квадратичную нелинейность, а граничные условия являются однородными условиями Неймана. В работе рассматривается классическое решение задачи (1) класса  $C^2([a, b]; C^2[0, T])$ . Сведением задачи к абстрактному интегральному уравнению Вольтерры 2 рода и применением метода сжимающих отображений доказывается локальная разрешимость задачи (1) в смысле пространства  $C([a, b] \times [0, T])$ . Применяя «бутстэп»-метод, гладкость решения повышается до класса  $C^2([a, b]; C^2[0, T])$ . Далее методом пробных функций при некотором достаточном условии доказывается разрушение за конечное время классического решения задачи (1) и находится верхняя оценка для времени разрушения.

### Список литературы

1. Корпусов М.О., Лукьяненко Д.В., Панин А.А., Юшков Е.В. Blow-up for one Sobolev problem: theoretical approach and numerical analysis // J. Math. Anal. Appl. 2016. V. 442. № 2. P. 451–468.
2. Корпусов М.О., Лукьяненко Д.В., Овсянников Е.А., Панин А.А. Локальная разрешимость и разрушение решения одного уравнения с квадратичной некоэрцитивной нелинейностью // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. 2017. Т. 10. № 2. С. 107–123.
3. Корпусов М.О., Овсянников Е.А. Локальная разрешимость, разрушение и гёльдеровская регулярность решений некоторых задач Коши для нелинейных уравнений теории волн в плазме. I. Формулы Грина // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2022. Т. 62. № 10. С. 1639–1661.
4. Корпусов М.О., Овсянников Е.А. Локальная разрешимость, разрушение и гёльдеровская регулярность решений некоторых задач Коши для нелинейных уравнений теории волн в плазме. II. Теория потенциала // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2023. Т. 63. № 2. С. 282–316.
5. Корпусов М.О., Овсянников Е.А. Локальная разрешимость, разрушение и гёльдеровская регулярность решений некоторых задач Коши для нелинейных уравнений теории волн в плазме. III. Задачи Коши // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2023. Т. 63. № 7. С. 1109–1127.

Д.А. ОВСЯННИКОВ, И.Д. РУБЦОВА, Л.В. ВЛАДИМИРОВА, Н.С. ЕДАМЕНКО, А.Р. БУШИН

Санкт-Петербургский государственный университет, Россия



## ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К ПАРАМЕТРИЗАЦИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе обсуждаются вопросы параметризации управляющих функций в математических моделях динамических процессов с целью их дальнейшей оптимизации по параметрам. В частности, рассматривается задача отыскания значений параметров, которые обеспечивают приемлемые характеристики процесса и могут использоваться в качестве начальных значений при его оптимизации. Задача сводится к решению системы нелинейных уравнений, которое осуществляется численно при использовании генетического стохастического алгоритма с мутацией. Предложенный подход применяется при исследовании динамики пучка в линейном ускорителе.

D.A. OVSYANNIKOV, I.D. RUBTSOVA, L.V. VLADIMIROVA, N.S. EDAMENKO, A.R.  
BUSHIN

*St. Petersburg State University, Russia*

### ON ONE APPROACH TO CONTROL FUNCTIONS PARAMETERIZATION IN OPTIMIZATION PROBLEMS

The paper discusses the problems of control functions parameterization in mathematical models of dynamic processes for the purpose of their further parameter optimization. In particular, the problem of finding parameter values that provide acceptable process characteristics and can be used as initial values for its optimization is considered. The problem comes down to nonlinear equations system solving, which is carried out numerically using a genetic stochastic algorithm with mutation. The approach suggested is applied for beam dynamics investigation in a linear accelerator.

При решении задач оптимизации динамических процессов часто бывает удобна и полезна параметризация управляющих функций. В дальнейшем задача сводится к поиску экстремума функционала качества по параметрам. При этом возникает ряд проблем. Одна из них состоит в выборе или построении некоторого типа параметризованных функций, которые представляли бы достаточно широкий класс допустимых управлений и при этом позволяли бы обеспечить приемлемое качество управляемого процесса. Далее необходимо описать область возможных изменений введенных параметров, которые будут использоваться при оптимизации.

Предполагается, что понимание сущности динамического процесса и опыт его исследования дают возможность прогнозировать поведение управляющих функций, обеспечивающих допустимое качество рассматриваемого процесса, которое предстоит повысить при оптимизации. Эта информация позволяет подобрать тип функций, на основе которых будет строиться параметризация (например, полиномы, тригонометрические функции и т.д.). Кроме того, появляется возможность считать, что параметризованные управления принимают определенные значения в контрольных точках. Это позволяет найти соответствующие значения параметров, которые могут быть использованы в качестве начальных значений при оптимизации исследуемого процесса. После серии экспериментов может быть определена и область изменения варьируемых параметров.

Таким образом, задача отыскания конкретных значений управляющих параметров сводится к решению системы однородных нелинейных уравнений, которая, в свою очередь, формулируется как задача минимизации нормы вектор-функции, представляющей левую часть системы. Для осуществления поиска глобального минимума в настоящей работе используется генетический стохастический алгоритм [1] с мутацией [2-3]. Алгоритм основан на моделировании нормального распределения, однако не требует расчета матрицы ковариаций. Мутация каждого поколения пробных точек состоит в разбиении его на группы, для которых используются различные среднеквадратические отклонения; это позволяет избежать быстрого стягивания выборки в точку локального экстремума.

Описанный подход применен в задаче исследования динамики пучка в линейном ускорителе. Проведена параметризация управляющих функций, характеризующих изменение вдоль структуры амплитуды ускоряющей волны и синхронной фазы. При отыскании начальных значений параметров для последующей оптимизации мы опирались на опыт исследования динамики пучка в работе [4]. Следует отметить гладкость и простоту расчета параметризованных управлений, а также сравнительно небольшую размерность пространства управляющих параметров.

#### *Список литературы*

1. Ermakov S.M., Semenchikov D.N. Genetic global optimization algorithms. Communications in Statistics Part B: Simulation and Computation, 2019, <https://doi.org/10.1080/03610918.2019.1672739>.
2. Ovsyannikov D.A., Vladimirova L.V., Rubtsova I.D., Rubanik A.V., Ponomarev V.A. Modified Genetic Algorithm of Global Extremum Search in Combination with Directional Methods. The Bulletin of Irkutsk State University. Series Mathematics, 2022, vol. 39, pp. 17-33. <https://doi.org/10.26516/1997-7670.2022.39.17>.
3. Rubtsova I.D., Vladimirova L.V., Zhdanova A.Y., Edamenko N.S. Beam Dynamics Optimization in an Accelerator Using a Genetic Algorithm with Mutation. Physics of Atomic Nuclei. 85, 10, pp. 1661-1664. <https://doi.org/10.1134/S1063778822100453>
4. Ovsyannikov A.D., Shirokolobov A.Y. Mathematical model of beam dynamics optimization in traveling wave // Proceedings of the RuPAC'12, St. Petersburg, 2012. Pp. 355-357. <http://www.JACoW.org>.

У.К. МАХМАНОВ, А.Н. ОЛИМОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова, Ташкент, Узбекистан*

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

В данной работе мы исследуем применение методов машинного обучения (МО) с использованием экспериментальных данных, для оптимизации процесса изготовления тонких пленок  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$  с целью улучшения характеристик солнечных элементов. Оптимизированный модел МО демонстрируют хорошую точность прогнозирования плотности тока короткого замыкания ( $I_{кз}$ ) с среднеквадратичной ошибкой  $\sim 3,76$  мА/см<sup>2</sup> и коэффициент Пирсона  $r \approx 0,86$ . Кроме того, метод аддитивного объяснения Шепли используется для ранжирования параметров изготовления, которые оказывают влияние на  $I_{кз}$ .

U.K. MAKHMANOV, A.N. OLIMOV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan*

## FABRICATION PROCESS ANALYSIS OF $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$ THIN FILMS FOR SOLAR CELLS VIA MACHINE LEARNING

In this work, we explore the application of machine learning (ML) techniques using the experimental data to optimize the fabrication process of  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$  thin films, targeting to enhance the device performance. The optimized MO model demonstrates good accuracy in predicting short-circuit current density ( $I_{sc}$ ) with a root mean square error 3.76 mA/cm<sup>2</sup> and a Pearson coefficient  $r \approx 0.86$ . Furthermore, the Shapley additive explanations method is employed to rank the fabrication parameters that have an impact  $I_{sc}$ .

За последнее десятилетие произошли значительные улучшения в эффективности преобразования энергии солнечных элементов на основе  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$ , достигнув рекордного уровня в 10,75% [1]. Тем не менее его максимальная эффективность конверсии все еще далека от теоретически рассчитанной эффективности  $\sim 32\%$  из-за относительно низкого  $I_{кз}$  по сравнению с их теоретическим пределом (32,88 мА/см<sup>2</sup>) для солнечных элементов при ширине запрещенной зоны 1,4 эВ, установленной моделью Шокли-Квайсера [2]. Последние исследования показали, что происхождение потерь  $I_{кз}$  в солнечных элементах с тонкими пленками  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$  в основном связано с наличием дефектов глубокого уровня в объеме и на границах, низкой подвижностью носителей заряда, плохой кристалличностью базового слоя и невыгодной ориентацией кристаллов. Эти параметры напрямую зависят от параметров осаждения пленки. База данных для модела МО был составлен из 5 компонентов (толщина пленки, скорость осаждения, температура подложки,  $I_{кз}$ , логарифмическое значение давления осаждения и химического состава). Химический состав отражается шириной запрещенной зоны. Модель RF (RandomForest) машинного обучения обучается на случайно выбранных 80% общих данных, а оставшиеся 20% используются для тестирования модели МО. Оптимизированный RF модель демонстрируют хорошую точность прогнозирования  $I_{кз}$  с среднеквадратичной ошибкой  $\sim 3,76$  мА/см<sup>2</sup> и коэффициентом Пирсона  $r \approx 0,86$ . Методом объяснения аддитивного Шэпли (SHAP) установлено, что давление осаждения пленок является одним из основных параметров в эволюции  $I_{кз}$ . На рис.1 представлено значение SHAP для  $I_{кз}$ .

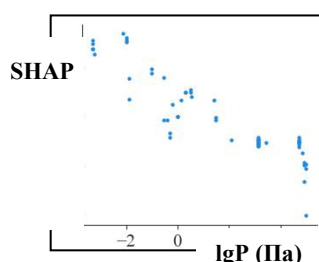


Рис. 1. Эволюция изменения SHAP в зависимости от давления осаждения пленки.

Как видно из рис. 1, наблюдается четкая тенденция уменьшения величины SHAP с увеличением давления осаждения тонких пленок. Это можно объяснить эволюцией морфологии и дефектных свойств пленок  $Sb_2(S_xSe_{1-x})_3$  в зависимости от давления. Полученные пленки при низком давлении с более мелкими размерами зерен, имеют увеличенную плотность дефектов глубокого уровня, связанных именно с границами зерен. При этом захваченные носители заряда остаются подвижными и вносят свой вклад к увеличению  $I_{кз}$ .

*Список литературы*

1. X. Chen et al. // Adv Energy Mater, 2023, Vol. 13, No. 21, С. 2300391.
2. S. Rühle // Solar Energy, 2016, Vol. 130, С. 139-147.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НОРМАЛЬНО-КРУГОВОГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА

Разработана математическая модель формирования напряженного состояния в круглой стальной пластине при воздействии нормально-кругового источника тепла. Представленные результаты расчета подтверждают, что разработанная модель позволяет учитывать влияние различных факторов на распределение напряжений.

A.P. PILIPCHUK, O.G. DEVOINO  
Academy of Military of the Republic of Belarus, Minsk  
Belarusian National Technical University, Minsk

## SIMULATION OF A FLAT STRESS STATE IN A ROUND PLATE UNDER INFLUENCE OF NORMAL CIRCULAR HEAT SOURCE

A mathematical model has been developed for the formation of a stressed state in a round steel plate under the influence of a normally circular heat source. The presented calculation results confirm that the developed model allows one to take into account the influence of various factors on the stress distribution.

Возникающие при лазерной обработке термические напряжения в значительной степени влияют на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя и являются причиной трещинообразования [1]. Данную особенность лазерной обработки необходимо учитывать при определении режимов лазерной закалки и очистки. Эффективным способом исследования процесса формирования термических напряжений в настоящее время является математическое моделирование на основе решения задач теории теплопроводности и упругости. В настоящей работе представлена математическая модель формирования напряженного состояния в круглой стальной пластине при воздействии нормально-кругового источника тепла. Рассмотрен случай воздействия нормально-кругового источника тепла мощностью 1 кВт диаметром 1 мм на поверхность круглой стальной пластины (диска) постоянной толщины диаметром 60 мм закрепленной по контуру.

На первом этапе для пластин толщиной 20 мм (1 вариант) и 10 мм (2 вариант) выполнен расчет температурного поля (рис. 1) по методике [2] без учета теплоотдачи с поверхности. Расчет радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  температурных напряжений (рис. 2, 3), возникающих при нагреве диска выполнен по методике [3].

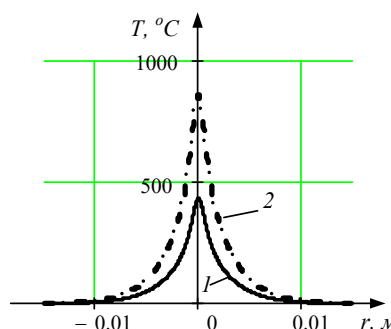


Рис. 1 Расчетные варианты распределения температуры

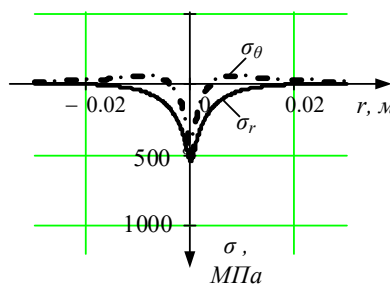


Рис. 2 Распределение радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  температурных напряжений в пластине (1 вариант)

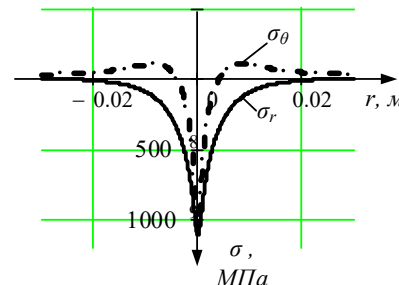


Рис. 3 Распределение радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  температурных напряжений в пластине (2 вариант)

Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод, что разработанная модель позволяет учитывать влияние различных факторов на распределение напряжений. В случае пластины малой толщины (2 вариант) рассчитанные значения напряжений превосходят предел прочности стали. В этом случае для учета возникающих пластических деформаций возможно применение метода переменных параметров упругости [3].

### Список литературы

1. Карлов Н.В., Кириченко Н.А., Лукьянчук Б.С. Лазерная термохимия. – М.: Наука. 1992. – 296 с.
2. Рыкалин, Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: ГНТИМЛ, 1951. – 298 с.
3. Термопрочность деталей машин / И. А. Биргер [и др.]. М.: «Машиностроение», 1975. – 455 с.

**ПОЛУЧЕНИЕ n-ЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЯДА ПО  $c_n, u_n, v_n$ , СТЕПЕНЯМ  $\vartheta$  ДЛЯ ИСКОМЫХ ФУНКЦИЙ  $c(\xi, \vartheta), u(\xi, \vartheta), v(\xi, \vartheta)$  В ЗАДАЧЕ ОБ ИСТЕЧЕНИИ ГАЗА В ВАКУУМ НА КОСОЙ СТЕНКЕ**

В настоящей работе приведен результат построения и анализ дифференциального уравнения для нахождения коэффициента ряда  $c_n$  аналитического решения задачи, описывающего разлет газа в вакуум на косоугольной стенке в общем несогласованном случае. Решение задачи строится в виде рядов функций  $c, u$  и  $v$  по степеням  $\vartheta$ , где  $\vartheta$  – известная функция автомодельных переменных  $\xi = x/t, \eta = y/t$ . Показано, что построенное уравнение для коэффициента ряда  $c_n$  есть линейное неоднородное дифференциальное уравнение. Коэффициенты, входящие в уравнение, и неоднородная часть уравнения являются аналитическими функциями переменной  $\xi$ . Таким образом, особенность полученного решения СУГД [1] является единственной, и полностью определяет характер течения в области двойной волны сжатия.

E.I. PONKIN

*Snezhinsk Engineering and Technological Institute of National Research Nuclear University MEPhI, Snezhinsk, Russia*  
**OBTAINING THE n-TH COEFFICIENTS OF THE SERIES BY  $c_n, u_n, v_n$ , POWERS OF  $\vartheta$  FOR THE SOUGHT FUNCTIONS  $c(\xi, \vartheta), u(\xi, \vartheta), v(\xi, \vartheta)$  IN THE PROBLEM OF GAS OUTFLOW INTO VACUUM ON AN OBLIQUE WALL**

The paper presents the result of constructing and analyzing a differential equation for finding the coefficient of the series  $c_n$  of an analytical solution to the problem describing the expansion of gas into vacuum on an inclined wall in the general inconsistent case. The solution to the problem is constructed in the form of series of functions  $c, u$  and  $v$  in powers of  $\vartheta$ , where  $\vartheta$  is a known function of self-similar variables  $\xi = x/t, \eta = y/t$ . It is shown that the constructed equation for the coefficient of the series  $c_n$  is a linear inhomogeneous differential equation. The coefficients included in the equation and the inhomogeneous part of the equation are analytical functions of the variable  $\xi$ . Thus, the peculiarity of the obtained SEGД solution [1] is shown to be the only one and to determine completely the nature of the flow in the region of the double compression wave.

Рассматривается начально-краевая задача, описывающая при  $t > 0$  истечение политропного газа в вакуум с косоугольной стенки в несогласованном случае [1]:

$$\begin{cases} ((\mathbf{B})_0 - f\ddot{y}(x)(\mathbf{A})_0) \mathbf{U}_J + (\mathbf{A})_0 \mathbf{U}_x = 0, \\ \mathbf{U}|_{J=0} = \mathbf{U}_0, \\ v|_{y=x \operatorname{tg} \alpha} = u \operatorname{tg} \alpha|_{y=x \operatorname{tg} \alpha}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{U} = (c, u, v)^T$ . Матрицы  $(\mathbf{A})_0$  и  $(\mathbf{B})_0$  соответственно равны:

$$(\mathbf{A})_0 = \begin{pmatrix} \chi - x & \psi c & 0 \\ c/\psi & u - x & 0 \\ 0 & 0 & u - x \end{pmatrix}, \quad (\mathbf{B})_0 = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & \psi c \\ 0 & b_{11} & 0 \\ c/\psi & 0 & b_{11} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь  $b_{11} = v - J - f(x)$ , функция  $f(\xi)$  задает в пространстве переменных  $\xi, \vartheta$  звуковую характеристику ( $\vartheta = 0$ ), разделяющую плоское течение и течение типа двойной волны,  $\chi = \frac{\gamma-1}{2}$ . Третье уравнение системы

**Ошибка! Источник ссылки не найден.** задает условие непротекания на косоугольной стенке. Решение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** строится в виде сходящегося ряда по степеням  $\vartheta$ :

$$\mathbf{U}(x, J) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{U}_k(x) \frac{J^k}{k!}; \quad \mathbf{U}_k(x) = \left. \frac{\mathbb{1}^k \mathbf{U}}{\mathbb{1} J^k} \right|_{J=0} \quad (3)$$

Алгоритм построения решения задачи **Ошибка! Источник ссылки не найден.** в виде ряда **Ошибка! Источник ссылки не найден.** основан на аналоге теоремы Ковалевской, доказанной в работе [2]. Коэффициенты ряда  $u_1$  и  $v_1$  находят в результате подстановки в систему **Ошибка! Источник ссылки не найден.** значения  $\vartheta = 0$ .

Коэффициент ряда  $c_n$  находят из решения уравнения, которое строится путем дифференцирования  $n$  раз по  $\vartheta$  системы из задачи **Ошибка! Источник ссылки не найден.** и подстановки в нее значения  $\vartheta = 0$

$$\begin{aligned} & [(\mathbf{B})_0 - f\ddot{y}(\mathbf{A})_0] \mathbf{U}_{n+1} - n \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{U}_n + (\mathbf{A})_0 \mathbf{U}_{\ddot{y}} + \\ & + \sum_{k=1}^n C_n^k [(\mathbf{B}_k - f\ddot{y}_k \mathbf{A}_k) \mathbf{U}_{n+1-k} + \mathbf{A}_k \mathbf{U}_{\ddot{y}_{n-k}}] = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{U}_J^{(k)} = \mathbf{U}_k = (c_k, u_k, v_k)^T$ ,  $\mathbf{U}_{Jx}^{(k)} = \mathbf{U}_{\ddot{y}} = (c_{\ddot{y}}, u_{\ddot{y}}, v_{\ddot{y}})^T$ ,  $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ , а  $\mathbf{E}$  – единичная матрица.

Далее из второго и третьего уравнения системы **Ошибка! Источник ссылки не найден.** выразим  $u_{n+1}$  и  $v_{n+1}$

$$u_{n+1} = \frac{c_{n+1} c_0 f \ddot{y}}{\zeta c_0 f \ddot{y} - f} + R_n, \quad (5)$$

$$v_{n+1} = -\frac{c_{n+1} c_0}{\zeta c_0 f \ddot{y} - f} + Q_n, \quad (6)$$

где

$$R_n = -\frac{c \ddot{y}}{\zeta c_0 f \ddot{y} - f} \frac{c_0}{f} + \frac{c_0 f \ddot{y}}{c_0 f \ddot{y} - f} e^{-\zeta} \prod_{k=1}^n \frac{c_k}{\zeta c_{n+1-k}} +$$

$$+ \frac{1}{c_0 f \ddot{y} - f} \frac{f}{\zeta} u_n + n u_n - \prod_{k=1}^n c_k \left( (v_k - f \ddot{y}_k) u_{n+1-k} + u_k v_{n-k} \right) \frac{\zeta}{f}$$

$$Q_n = -\frac{1}{c_0 f \ddot{y} - f} e^{-\zeta} \prod_{k=1}^n \frac{c_k}{\zeta c_{n+1-k}} +$$

$$+ \frac{1}{c_0 f \ddot{y} - f} \frac{f}{\zeta} v_n + n v_n - \prod_{k=1}^n c_k \left( (v_k - f \ddot{y}_k) v_{n+1-k} + u_k v_{n-k} \right) \frac{\zeta}{f}$$

В выражениях **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, **Ошибка! Источник ссылки не найден.** при замене  $n+1 \rightarrow n$  можно получить формулы для  $u_n$  и  $v_n$ . При подстановке  $u_{n+1}$  и  $v_{n+1}$  в первое уравнение системы **Ошибка! Источник ссылки не найден.** после преобразований, получим дифференциальное уравнение для коэффициента  $c_n$

$$c \ddot{y} + P(x) c_n + S_{n-1}(x) = 0. \quad (7)$$

Здесь

$$P(x) = \frac{1}{2f} \frac{f}{\zeta} c \ddot{y} \frac{c_0 f}{c_0^2 + f^2} + (c \ddot{y} + u \ddot{y}) \frac{c_0}{f} \frac{c_0^2 - f^2}{c_0^2 + f^2} + \frac{c_0}{f} (c \ddot{y} - n) \frac{\zeta}{f}$$

$$- \frac{1}{2f} \frac{f}{\zeta} \frac{f}{c_0} - (n+1) \frac{c_1}{2c \ddot{y}} \frac{c_0^2 + f^2}{c_0 f} \frac{\zeta}{f}$$

$$S_{n-1}(x) = \frac{1}{2f} \zeta (c_0 Q_{n-1} - f R_{n-1}) +$$

$$+ \frac{1}{2f} (Q_{n-1} - f R_{n-1}) \frac{f}{\zeta} \frac{c_0 f \ddot{y} - f}{c_0} + \zeta \frac{1}{f} + \frac{c_1 c_0 f \ddot{y} - f}{c \ddot{y} c_0} \frac{\zeta}{f}$$

$$+ \frac{n c_1}{2f} \frac{f \ddot{y}}{c \ddot{y}} + u_{n-1} \frac{c_0 f \ddot{y} (1 + \zeta) + \zeta c_0}{c_0 f \ddot{y} - f} - v_{n-1} \frac{c_0 f \ddot{y}}{c_0 f \ddot{y} - f} + \frac{1}{2f} \frac{c \ddot{y}}{c_0} (c_0 f \ddot{y} - f) R_{n-1} -$$

$$- \frac{1}{2f} e^{-\zeta} \prod_{k=2}^{n-1} c_k \frac{f \ddot{y}_k - f \ddot{y}_k}{c_0} - \frac{c_0 f \ddot{y} - f}{c_0} c_k \frac{\zeta}{f} v_{n+1-k} - \zeta f \ddot{y}_{n+1-k} - \frac{c_0 f \ddot{y} - f}{c_0} c_{n+1-k} \frac{\zeta}{f}$$

$$+ \frac{1}{2f} e^{-\zeta} \prod_{k=2}^{n-1} c_k \frac{f \ddot{y}_k}{c_0} + u_k \frac{c_0 f \ddot{y} - f}{c_0} + \zeta \frac{f \ddot{y}_k}{c_0} \frac{\zeta}{f} v_k + c_k \frac{c_0 f \ddot{y} - f}{c_0} + \zeta v_k \frac{\zeta}{f}$$

Построенное уравнение **Ошибка! Источник ссылки не найден.** для коэффициента ряда  $c_n$  есть линейное неоднородное дифференциальное уравнение. Коэффициенты, входящие в уравнение, и неоднородная часть уравнения являются аналитическими функциями переменной  $\zeta$ . Таким образом, особенность полученного решения СУГД [1] является единственной, и полностью определяет характер течения в области двойной волны сжатия.

#### Список литературы

1. Понькин, Е. И. Автомодельное решение системы уравнений газовой динамики, описывающей истечение политропного газа в вакуум с косою стенкой в несогласованном случае // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки. – 2023. – № 2. – С. 27–39.
2. Понькин Е. И. Характеристическая задача Коши стандартного вида для описания истечения политропного газа в вакуум с косою стенкой // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. Науки., 2022. Т.26, №2. С. 322-338.

П. СИРИВАТ, С.В. МЕЛЕШКО

*Школа Науки, Ма Фа Луанг Университет МФУ, Чианг Рай, Таиланд  
Школа Математики и Геоинформатики, Технологический Университет им. Суранари, Накхон Ратчасима, Таиланд*

## **ПРИМЕНЕНИЕ RECIPROCAL ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ, СВЯЗАННОЙ С КЛАССИЧЕСКИМ ОДНОМЕРНЫМ УРАВНЕНИЕМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ**

Получены все автономные уравнения, которые эквивалентны классическому одномерному уравнению теплопроводности. Эквивалентность рассматривается относительно reciprocal преобразований.

P. SIRIWAT, S.V. MELESHKO

*School of Science, (Mae Fah Luang University), Chiang Rai, Thailand  
School of Mathematics and Geoinformatics, Institute of Science (Suranaree University of Technology), Nakhon Ratchasima, Thailand*

## **APPLICATION OF RECIPROCAL TRANSFORMATIONS FOR SOLVING EQUIVALENCE PROBLEM RELATED WITH THE CLASSICAL ONE-DIMENSIONAL HEAT EQUATION**

All equations that are equivalent to the classical one-dimensional heat equation are studied. Equivalence is considered with respect to reciprocal transformations.

Доклад посвящен проблеме эквивалентности, связанной с классическим одномерным уравнением теплопроводности. Ранее для такой задачи применялись частные точечные преобразования. В данном исследовании мы применяем reciprocal преобразования. Эти преобразования можно рассматривать как обобщение преобразования Сандмана для уравнений с более чем одной независимой переменной. Решение проблемы эквивалентности осуществляется в два этапа. Первый этап состоит из поиска необходимых условий, за которым следует второй этап определения достаточных условий. На первом этапе были определены необходимые формы автономных уравнений, которые путем reciprocal преобразования можно преобразовать к классическому уравнению теплопроводности. Для каждой формы найдены достаточные условия и преобразование. Приведем пример одного такого класса уравнений, который можно свести к классическому уравнению теплопроводности с помощью reciprocal преобразования

$$u_{xx} + u_x^2(\alpha(u)u_t + \beta(u) + \gamma(u)u_x) = 0.$$

Функции  $\alpha(u)$  и  $\beta(u)$  должны удовлетворять одному обыкновенному дифференциальному уравнению, включающему производные от  $\alpha(u)$  до 5-го порядка и  $\beta(u)$  до 4-го порядка. Функция  $\gamma(u)$  является произвольной. В частности, выбирая  $\alpha = q_1 u^{k_1}$ ,  $\beta = q_2 u^{k_2}$  это уравнение удовлетворяется для следующих случаев:

$$\{k_1 = -2, k_2 = -1\}; \{k_1 = -2, q_2 = 0\}; \{k_1 = -2(q_2 + 2), k_2 = -1\}; \\ \{k_1 = -2, k_2 = -1\}; \{k_1 = -2, q_2 = 0\}; \{k_1 = -2(q_2 + 2), k_2 = -1\};$$

Работа выполнена при финансовой поддержке Университета Мае Фа Луанг (This work was financially supported by Mae Fah Luang University).

Л.И. МОГИЛЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.В. ПОПОВА<sup>1</sup>, М.В. ПОПОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия*

<sup>2</sup>*Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия*

## **НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В СТЕНКАХ КОЛЬЦЕВОГО КАНАЛА ИЗ МАТЕРИАЛА С КОМБИНИРОВАННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И ЗАПОЛНЕННОГО ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТЬЮ**

Проведено математическое моделирование эволюции уединенных продольных волн деформации в двух соосных оболочках, образующих стенки кольцевого канала, заполненного вязкой несжимаемой жидкостью. Рассмотрен случай физически нелинейных оболочек из материала с дробно-квадратической нелинейностью, а также учета инерции движения жидкости. Получена и численно исследована система двух эволюционных уравнений, обобщающих уравнение Кортевега-де-Вриза-Шамеля (КдВ-Шамеля).

L.I. MOGILEVICH<sup>1</sup>, E.V. POPOVA<sup>1</sup>, M.V. POPOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia*

<sup>2</sup>*Saratov State University, Saratov, Russia*

## **NONLINEAR DEFORMATION WAVES IN THE WALLS OF AN ANNULAR CHANNEL MADE OF MATERIAL WITH COMBINED NONLINEARITY AND FILLED WITH VISCOUS INCOMPRESSIBLE FLUID**

Mathematical modeling of the evolution of solitary longitudinal deformation waves in two coaxial shells forming the walls of an annular channel filled with viscous incompressible fluid was carried out. The case of physically nonlinear shells made of material with fractional-quadratic nonlinearity, as well as the inertia of fluid was considered. A system of two evolution equations generalizing the Korteweg-de Vries-Schamel (KdV-Schamel) equation is obtained and numerically investigated.

Нелинейная волновая динамика сплошных сред составляет одно из направлений современной математической физики [1]. В ее рамках в [2] получено обобщение уравнения Шамеля для цилиндрической оболочки из несжимаемого материала с мягкой дробной физической нелинейностью и показано, что уравнение допускает солитонное решение. Оболочки широко используются для транспортировки жидкости, а, следовательно, для них актуальны задачи гидроупругости [3]. В [4] получено уравнение КдВ для прогиба геометрически нелинейной оболочки, содержащей идеальную несжимаемую жидкость. В [5] учтено влияние вязкости жидкости и на основе асимптотического анализа задачи гидроупругости стенок кольцевого канала из материала с дробной нелинейностью получена и численно исследована система двух эволюционных уравнений, обобщающих уравнение Шамеля. В предлагаемом исследовании осуществлен вывод уравнений динамики оболочки из материала, диаграмма деформирования которого аппроксимируется законом с жесткой комбинированной дробно-квадратической нелинейностью. Для двух таких соосных оболочек, между которыми находится вязкая несжимаемая жидкость поставлена задача гидроупругости с учетом инерции движения жидкости. Проведен асимптотический анализ данной задачи с помощью метода многих масштабов с последующим решением линеаризованных уравнений гидродинамики методом итерации. В результате получена системы двух нелинейных эволюционных уравнений, обобщающих уравнение КдВ-Шамеля. Используя технику базисов Грёбнера получена новая разностная схема для дискретизации системы обобщенных уравнений КдВ-Шамеля. На заключительном этапе проведена серия вычислительных экспериментов по изучению эволюции уединенных волн продольной деформации в стенках рассматриваемого канала. Проведенное моделирование позволило установить, что нелинейное решение, являющееся следующим приближением задачи эволюции волн продольной деформации, увеличивает скорости уединенных волн по сравнению с линейным приближением и волны становятся сверхзвуковыми. Кроме того, вычислительные эксперименты показали, что уединенные волны, возбуждаемые в оболочках, с течением времени сохраняют свою скорость и амплитуду и упруго взаимодействуют друг с другом, т.е. являются солитонами. Вязкость жидкости обуславливает передачу энергии от одной оболочки к другой в процессе эволюции нелинейных волн деформации.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00140.*

*Список литературы*

1. Кудряшов Н.А. Методы нелинейной математической физики. Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2010. 368 с.
2. Zemlyanukhin A.I., Bochkaev A.V., Andrianov I.V. and others // J. Sound Vib. 2021. Vol. 491. Art. no. 115752.
3. Paidoussis M.P. // J. Fluids Struct. 2021. Vol. 107. Art. no. 103374.
4. Кореньков А.Н. // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2019. Т. 6. № 1. С. 131-143.
5. Mogilevich L.I., Popova E.V. // Izvestiya VUZ. App. Nonlinear Dyn. 2023. Vol. 31, No. 3. P. 365-376.

**В.В. НАЗАРОВ**

*Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

## **КРИТЕРИЙ НАЧАЛА РАЗРУШЕНИЯ В ПОЛОМ ЦИЛИНДРЕ В УСЛОВИЯХ ВОДОРОДНОЙ КОРРОЗИИ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

Проведено моделирование физических и механических процессов, оказывающих решающее влияние на начальный момент разрушения в стальном полом цилиндре под внутренним давлением водорода при высокой температуре. При диффузии водорода в полый цилиндр происходит химическое взаимодействие водорода с карбидами стали, в результате чего образуется метан, который скапливается в микропорах и вызывает растрескивание стали. Предложены критерий начального момента разрушения, уравнение термомеханического состояния метана в микропорах, соотношение для пористости, а также уравнение накопления метана в поперечном сечении полого цилиндра.

**V.V. NAZAROV**

*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **CRITERION FOR THE BEGINNING OF RUPTURE IN A HOLLOW CYLINDER UNDER CONDITIONS OF HYDROGEN CORROSION AT HIGH TEMPERATURE**

The modeling of physical and mechanical processes that have a decisive effect on the initial time of rupture in a steel hollow cylinder under internal pressure of hydrogen at high temperature is carried out. When hydrogen diffuses into a hollow cylinder, hydrogen chemically interacts with steel carbides, resulting in the formation of methane, which accumulates in microspores and causes cracking of steel. The criterion of the initial time of rupture, the equation of the thermo mechanical state of methane in a microspores, the ratio for porosity, as well as the equation of methane accumulation in the cross section of a hollow cylinder are proposed.

Произведено моделирование процессов, оказывающих решающее влияние на зарождение коррозионных трещин. К таковым процессам относятся: накопление концентрации метана, развитие пористости, а также термическое состояние метана в микропорах обезуглероживаемой стали, которые могут привести к образованию коррозионных трещин. На практике воздействию водородной коррозии, в первую очередь, могут быть подвержены элементы конструктивных элементов, изготовленных из углеродистых и низколегированных сталей, применяющихся на аммиачных и нефтехимических заводах, на которых используют трубопроводы, теплообменники и сосуды под внутренним давлением, содержащие водород при высокой температуре [1–4]. Кроме этого, водородная коррозия возможна при нагреве или охлаждении парогенератора при получении водяного пара высокой температуры и давления с использованием теплоты сгорания водород-кислородной смеси [5].

Суть водородной коррозии заключается в том, что в диапазоне высоких температур от 200 до 600°C водород способен вступать в химическую реакцию с карбидами железа. На границе соприкосновения со сталью молекулы водорода адсорбируют на атомы, которые затем диффундируют внутрь твердого тела. Из-за своего большого размера молекула метана не способна к диффузии в твердом теле, что приводит к накоплению и увеличению концентрации метана в микропорах. При достижении давлением метана предела прочности происходит локальное разрушение с образованием межкристаллитных трещин, которые способны приводить к хрупкому разрушению.

Для защиты от разрушительного воздействия водородной коррозии стараются предотвратить соприкосновение водорода с поверхностью стали. Одним из решений этого вопроса являются различные покрытия, позволяющие предотвратить адсорбцию молекул водорода на атомы. Но с течением времени эксплуатации эти покрытия могут подвергаться износу и повреждению. Для обнаружения микротрещин, вызванных водородной коррозией, на производствах используют различные методы неразрушающего контроля.

Таким образом, предложена модель, которая позволяет определить начальный момент разрушения в стальном полом цилиндре, находящегося в условиях водородной коррозии при высокой температуре, где отличительная особенность проявляется в месте зарождения трещины: в условиях водородной коррозии трещина зародится в области, ограниченной внутренним граничным радиусом и средней линией в поперечном сечении; при отсутствии водородной коррозии, когда только ползучесть – зарождение трещины следует ожидать на внешнем граничном радиусе, на котором окружное напряжение достигает предела кратковременной прочности.

### *Список литературы*

1. Benac D. J., McAndrew P. // Journal of Failure Analysis and Prevention. 2012. Vol. 12, № 6. P. 624–627.
2. Martin M.L., Dadfarnia M., Orwig S., Moore D., Sofronis P. // Acta Materialia. 2017. Vol. 140. P. 300–304.
3. Honma Y., Hashi K. // ASME. Proceedings of the Pressure Vessels and Piping Conference, 2019. Vol. 6A.
4. Swindeman M., Pavlina E.J., Perdomo J. // ASME. Codes and Standards Conference, 2021. Vol. 1.
5. Богомолов А.Р., Прибатурин Н.А., Темникова Е.Ю. // Вестн. Кузб. гос. техн. ун-та. 2011. № 2. С. 71–75.



## ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА

Рассматривается обобщенное нелинейное уравнение Шрёдингера четвертого порядка с четырьмя степенными нелинейностями. Исследуемое уравнение является обобщением некоторых известных моделей и позволяет оценить влияние различных процессов при распространении импульса в оптических волокнах. Задача Коши для изучаемого уравнения не решается методом обратной задачи рассеяния, поэтому оно не относится к интегрируемым уравнениям в частных производных, однако данное уравнение имеет некоторые аналитические решения. Приведены светлые и вложенные солитоны, соответствующие рассматриваемой математической модели. Найдены законы сохранения дифференциального уравнения в частных производных для распространения импульсов. Вычислены сохраняющиеся величины для светлых и вложенных оптических солитонов.

N.A. KUDRYASHOV, D.R. NIFONTOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CONSERVATION LAWS OF THE FOURTH-ORDER NONLINEAR SHRÖDINGER EQUATION FOR THE EMBEDDED SOLITONS

The fourth-order nonlinear Shrödinger equation with four power nonlinearities is considered. The equation studied is the generalization of some well-known models and allows us to evaluate the influence various processes of pulse propagation. The main property of this equation is not integrability because the Cauchy problem for it can not be solved by the inverse scattering transform. However this equation has some analytical solutions. Optical and embedded solitons corresponding to the considered mathematical model are given. Conservation laws of the partial differential equation for propagation pulses are found. Conservative quantities for the bright and embedded optical solitons are calculated.

Законы сохранения являются важнейшей характеристикой нелинейных уравнений в частных производных. С помощью них можно оценить сохраняющиеся характеристики математических моделей. Известно, что законы сохранения соответствуют свойству интегрируемости нелинейных уравнений в частных производных.

В последние десятилетия в связи с необходимостью решения задач нелинейной оптики, в том числе задач передачи информации на большие расстояния, появился большой интерес к исследованию математических моделей распространения импульсов в нелинейно-оптических средах [1–3]. Используемые при описании нелинейные уравнения в частных производных обычно не относятся к классу уравнений, интегрируемых методом обратной задачи рассеяния, и, как правило, имеют три и менее закона сохранения.

В докладе представлены законы сохранения, соответствующие обобщенному нелинейному уравнению Шрёдингера четвертого порядка:  $iq_t + \frac{1}{2}q_{xx} + i\chi q_{xxx} + \varepsilon q_{xxxx} + |q|^2q + \gamma_1|q_x|^2q + \gamma_2|q|^2q_{xx} - \gamma_3|q|^4q = 0$ . Известно [4], что для данного уравнения существует две формы оптических солитонов: светлые и вложенные.

Как правило, законы сохранения, соответствующие нелинейным эволюционным уравнениям, находятся с помощью оператора Эйлера и минимизации Лагранжиана [5]. В данной работе для вычисления законов сохранения используются только преобразования. Метод, использованный в данной работе, имеет ряд преимуществ для определенного класса нелинейных эволюционных уравнений, к которым принадлежит рассматриваемое семейство.

Для того, чтобы найти сохраняющиеся величины уравнение приводится к виду  $\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial x} = 0$ ,  $T = T(q, q^*, q_x, q_x^*, q_{xx}, q_{xx}^*, \dots)$ ,  $X = X(q, q^*, q_x, q_x^*, q_{xx}, q_{xx}^*, \dots)$ . Тогда сохраняющиеся величины находятся интегрированием плотности  $T$ :  $\int_{-\infty}^{+\infty} T dx$ . В работе показано, что все уравнения семейства имеют три закона сохранения. Найдены все три плотности для произвольного порядка уравнения с ограничениями на параметры, плотности имеют вид:  $T_1 = |q|^2$ ,  $T_2 = \frac{i}{2}(qq_x^* - q^*q_x)$ ,  $T_3 = -\frac{1}{2}|q_x|^2 + \varepsilon|q_{xx}|^2 + \frac{1}{2}i\chi(q_xq_{xx}^* - q_x^*q_{xx}) + \frac{1}{2}|q|^4 - \frac{\gamma_3}{3}|q|^6$ . По найденным  $T$  вычислены сохраняющиеся величины для двух рассматриваемых решений.

### Список литературы

1. Kivshar Y.S., Agrawal G.P., Optical Solitons. From Fibers to Photonic Crystals, Academic Press, 2003
2. Kivshar Yu. S. and Malomed B. A., Dynamics of solitons in nearly integrable systems, Rev. Mod. Phys. (1989) 63, 763 – 915.
3. Kivshar Yu.S. and Pelinovsky D. E., Self - focusing and transversive instabilities of solitary waves, Phys. Reports (2000) 331(4), 117-195.
4. Kudryashov, Nikolay A., Exact solutions of equation for description of embedded solitons, 2022, Optik, 268, 10.1016/j.ijleo.2022.169801.
5. Olver P. J., Applications of Lie groups to differential equations, Springer-Verlag, New York inc, 1986.

А.А. НОВИКОВ<sup>1,2</sup>, А.Ю. ЛЕТУНОВ<sup>1,2</sup>, П.А. ЛОБОДА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина»

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ПЛОТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ИОННОЙ ДИНАМИКИ

Рассмотрено влияние теплового движения ионов на излучаемый спектр. Разработана модель, позволяющая рассчитывать спектральные линии с учетом ионной динамики. Выполнен расчет спектров аргона и выполнено сравнение с результатами моделирования других авторов. Проведен расчет спектров титана и хлора для условий лазерных экспериментов.

A.A. NOVIKOV<sup>1,2</sup>, A.YU. LETUNOV<sup>1,2</sup>, P.A. LOBODA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Scientific Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russia

## MODELING OF MULTIELECTRON ION SPECTRA IN HOT DENCE PLASMA CONSIDERING ION DYNAMIC EFFECTS

The influence of ion thermal motion on multielectron ions spectra is under consideration. The model, which allows to calculate spectrum considering ion dynamic effects, is developed. Calculation of argon spectrum and comparison with results by other authors is formed. Calculation of titanium and chlorine spectra for condition of laser experiment is carried out.

Моделирование спектральных характеристик плазмы сопряжено с решением широкого круга задач. Во-первых, требуется расчет атомных данных излучающих частиц, вычисление которых для многоэлектронных атомов и ионов требует учета релятивистских эффектов. Во-вторых, необходимо определение ионного состава плазмы с учетом возможной неравновесности плазмы с учетом влияния переноса излучения, радиационных и столкновительных процессов на населенности атомных уровней. В-третьих, существует отдельная задача о влиянии электрических и магнитных полей на непосредственно на спектр атомов и ионов, то есть на положение атомных уровней. В данный пункт включается определение влияния теплового движения заряженных частиц. Ключевой интерес представляет влияние на спектр электрических полей, то есть эффект Штарка.

Расчет спектров плазмы обычно выполняется в рамках стандартной теории, которая позволяет достаточно точно учитывать эффект Доплера, столкновения электронов в ударном пределе, то есть в пределе больших скоростей, однако влияние ионных столкновений описывается в приближении неподвижных ионов, которое не выполняется для условий ряда экспериментов. Иными словами, стандартная теория позволяет вычислять квазистатический спектр. Требуется переопределение вклада эффектов ионной динамики в спектр атомов и ионов в плазме.

В данной работе предложена модель, позволяющая описывать влияние динамики ионов на спектр плазмы. Модель базируется на квазистатической модели LINEDM [1], модифицированной с помощью метода флуктуирующей частоты (МФЧ) [2]. В рамках методики МФЧ результирующая спектральная картина характеризуется квазистатическим спектром и параметром частоты скачков амплитуды ионного микрополя.

Указанный параметр частоты скачков, предложенный в существующих методиках, таких как МФЧ или МММ [3], требует переопределения, так как вычисляется и размерных соотношений. В предложенной модели предлагается использовать для вычисления параметра частоты скачков теорию гравитационных флуктуаций С. Чандрасекара и Д. фон Неймана [4], адаптированную для случая электрического поля. Для распределения внутреннего электрического ионного микрополя используется распределение Хупера [1], замещающее распределение Хольцмарка. При расчете распределения Хупера учтено изменение ионного состава плазмы за счет неравновесности.

В рамках предложенной модели были выполнены расчеты спектральной линии  $\text{He}\beta$  аргона, рассматриваемого как примесь в плазме дейтерия, и проведено сравнение с результатами других авторов [5]. Проведено моделирование спектров титана и хлора для диапазона температур и плотностей. Выполнено сравнение с результатами лазерных экспериментов [6, 7] и определены диапазоны возможных параметров плазмы.

### Список литературы

1. Loboda P.A. et al. Line Shape Modeling of Multielectron Ions in Plasmas. // Laser and Particle Beams, 2000, Vol. 18, pp. 275- 289.
2. Talin B, et al. Frequency-Fluctuation Model for Line-Shape Calculations in Plasma Spectroscopy. // Phys. Rev. A, 1995, Vol. 51, №3, pp. 1918-1928.
3. Brissaud A., Frisch U. Theory of stark broadening-II exact line profile with model microfield // J. Quant. Sectrosc. Radiat. Transfer, 1971, Vol. 11, Pp. 1767-1783.
4. Chandrasekhar S. Stochastic Problems in Physics and Astronomy // Reviews of Modern Physics, 1943, Vol. 15, № 1, pp. 1-89.
5. Haynes D. A. et al Effects of ion dynamics and opacity on Stark-broadened argon line profiles // Phys. Rev. E, 1996, Vol. 53, pp. 1042-1050.
6. Kraus B. F., Gao Lan, Hill K.W. et al. // Phys. Rev. Lett., 2021, Vol. 127, pp. 205001.
7. Beiersdorfer P., Brown G. V., McKelvey A. et al. // Phys. Rev. A, 2019, Vol. 100, pp. 012511.

**ЛОКАЛЬНЫЕ БИФУРКАЦИИ ИНВАРИАНТНЫХ МНОГООБРАЗИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ УРАВНЕНИЯ КУРАМОТО-СИВАШИНСКОГО С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИИ**

Рассмотрена периодическая краевая задача для уравнения Курамото-Сивашинского, в котором учтена дисперсия. Изучен вопрос о влиянии дисперсии на динамику решений и, в частности, локальных бифуркаций в окрестности пространственно однородных состояний равновесия.

A.N. KULIKOV, D.A. KULIKOV

Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

**LOCAL BIFURCATIONS OF INVARIANT MANIFOLDS OF THE PERIODIC BOUNDARY-VALUE PROBLEM OF THE KURAMOTO-SIVASHINSKY EQUATION WITH DISPERSION INVOLVED**

A periodic boundary value problem for the Kuramoto-Sivashinsky equation, in which dispersion is taken into account, is considered. The question of the influence of dispersion on the dynamics of solutions and, in particular, local bifurcations in the vicinity of spatially homogeneous equilibrium states has been studied.

В работе [1] была предложена одна из модификаций широкоизвестного уравнения Курамото-Сивашинского, в которой было предложено учесть такой фактор как дисперсия. Для этого была рассмотрена краевая задача (КЗ)

$$u_t + uu_x + u_{xx} + \delta u_{xxx} + u_{xxxx} = 0, \delta \in R, \\ u(t, x + 2l) = u(t, x)$$

После нормировок

$$t_1 = \left(\frac{\pi}{l}\right)^4 t, \quad x_1 = \left(\frac{\pi}{l}\right)x, \quad u_1 = \left(\frac{l}{\pi}\right)^3 u$$

получим КЗ

$$u_t + uu_x + bu_{xx} + au_{xxx} + u_{xxxx} = 0, \tag{1}$$

$$u(t, x + 2\pi) = u(t, x), \tag{2}$$

в которой для  $t_1, x_1, u_1$  возвращены обозначения  $t, x, u$ . Здесь  $b = (l/\pi)^2, a = \delta(l/\pi)$ .

КЗ (1),(2) имеет однопараметрическое семейство пространственно однородных состояний равновесия  $u(t, x) = c, c \in R$ .

В статье [2] было показано, что при  $b = m^2(1 + \varepsilon)$  ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ),  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_m), \varepsilon_m > 0$  справедливо утверждение.

**Теорема.** При любом  $m \in N$  можно указать такую положительную постоянную  $\varepsilon_m > 0$ , что при всех  $\varepsilon \in (0, \varepsilon_m)$  КЗ (1),(2) имеет двухпараметрическое семейство пространственно неоднородных  $t$  периодических решений

$$u_m(t, x, \varepsilon) = c + \varepsilon^{1/2} \rho_0(m) (\exp(i\Theta_m(t, x, c, \varphi)) + \exp(-i\Theta_m(t, x, c, \varphi))) + O(\varepsilon), \tag{3}$$

где  $c, \varphi \in R$  и произвольны,

$\rho_0(m) = \sqrt{3m^2(4m^2 + a^2)}$ ,  $\Theta_m(t, x, c, \varphi_m) = (\sigma_m + \varphi_m(\varepsilon))t$ ,  $\sigma_m = am^3 - cm$ ,  $m = 1, 2, 3, \dots$ . Функции  $\varphi_m(\varepsilon)$  определяются при построении решений, формирующих  $V_2(m)$ ,  $\varphi_m(0) = 0$ .

Двумерные многообразия  $V_2(m)$ , сформированные решениями  $u_m(t, x, \varepsilon)$  при  $m \neq 1$ , седловые (неустойчивые), а при  $m = 1$  оно является локальным аттрактором.

При этом решения, принадлежащие  $V_2(1)$  орбитально устойчивы, но не будут асимптотически орбитально устойчивыми, а также устойчивыми в смысле классического определения А.М. Ляпунова.

Отметим, что асимптотические формулы (3) могут быть уточнены. Быть может, следует подчеркнуть, что при  $b < 1$  ( $1 < \pi$ ) инвариантные многообразия  $V_2(m)$  отсутствуют и более того все решения КЗ (1), (2) с течением времени приближаются к одному из состояний равновесия  $u(t, x) = c$ .

*Список литературы*

1. Кудряшов Н.А., Рябов П.Н., Петров Б.А. // Модел. анал. информ. сист. 2015. Т. 22, № 1. С. 105–113.
2. Куликов А.Н., Куликов Д.А. // Итоги науки и техники. Серия “Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры”. 2023. Т. 226. С. 69-79.

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЁННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЁДИНГЕРА С АНТИКУБИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТРЕТЬЕЙ, ПЯТОЙ И СЕДЬМОЙ СТЕПЕНИ**

Рассмотрена редукция обобщённого нелинейного уравнения Шрёдингера с антикубической нелинейностью и нелинейностями третьей, пятой и седьмой степени в переменных бегущей волны. С использованием метода неявной функции получено аналитическое решение рассматриваемого уравнения.

A.A. KUTUKOV, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

**ANALYTICAL SOLUTIONS OF THE GENERALIZED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION WITH ANTI-CUBIC AND CUBIC-QUINTIC-SEPTIC NONLINEARITIES**

The traveling wave reduction of the generalized nonlinear Schrödinger equation with anticubic nonlinearity and cubic- quintic-septic nonlinearities is considered. Using the implicit function method, an analytical solution to the equation under consideration is obtained.

Распространение импульсов в нелинейной оптической среде обычно описывают обобщёнными нелинейными уравнениями Шрёдингера (НУШ) [1]. Учёт различных характеристик среды зачастую приводит к тому, что задача Коши для обобщённого НУШ не решается методом обратной задачи рассеяния. Тем не менее существуют специальные методы [2] для поиска точных решений неинтегрируемых уравнений в частных производных. В данной работе рассматривается одно из таких уравнений вида

$$iq_t + aq_{xx} + (b|q|^{-4} + c|q|^2 + g|q|^4 + h|q|^6)q = 0, \tag{1}$$

где  $q(x, t)$  комплекснозначная функция,  $x$  и  $t$  независимые переменные,  $a, b, c, g$  и  $h$  действительные параметры. После перехода к переменным бегущей волны

$$q(x, t) = \sqrt{U(z)}e^{i(\psi(z) - \omega t)}, z = x - C_0 t$$

и ряда прямых преобразований получается обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$U_z^2 + \frac{h}{a}U^5 + \frac{4g}{3a}U^4 + \frac{2c}{a}U^3 + \left(\frac{4\omega}{a} + \frac{C_0^2}{a^2}\right)U^2 + \frac{8C_2}{a}U + \frac{4(C_1^2 - ab)}{a^2} = 0, \tag{2}$$

где  $C_1$  и  $C_2$  константы интегрирования. Пусть  $C_2 = 0$  и  $C_1^2 = ab$ , тогда уравнение (2) можно записать в виде

$$U_z^2 = -\frac{h}{a}U^2(U - U_1)(U - U_2)(U - U_3), \tag{3}$$

где  $U_1, U_2, U_3$  корни полинома  $\frac{h}{a}U^3 + \frac{4g}{3a}U^2 + \frac{2c}{a}U + \left(\frac{4\omega}{a} + \frac{C_0^2}{a^2}\right) = 0$ .

Пусть  $U_3 = U_2$ , тогда уравнение (3) запишется в виде

$$U_z^2 = -\frac{h}{a}U^2(U - U_1)(U - U_2)^2. \tag{4}$$

Для решения уравнения (4) применяется метод неявной функции [2]. Пусть  $U(z) = F(\xi)$  и  $\xi_z^2 = -\frac{h}{a}F^2$ . Тогда решение уравнения (4) может быть получено в виде

$$F(\xi) = (U_2 - U_1)\tanh^2\left(\frac{1}{2}\sqrt{U_3 - U_1}(\xi - \xi_0)\right) + U_1, \tag{5}$$

$$z - z_0 = \frac{2a\arctan\left(\frac{U_2 e^{\sqrt{U_3 - U_1}(\xi - \xi_0)} - U_1 + 2U_1 - U_2}{2\sqrt{U_1}(U_2 - U_1)}\right)}{\sqrt{-ah}\sqrt{U_1 U_2}} + \frac{a\xi}{\sqrt{-ah}U_2}. \tag{6}$$

Соотношения (5)-(6) с учётом равенства  $U(z) = F(\xi)$  представляют собой решение уравнения (4), записанное в неявном виде.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00141, <https://rscf.ru/project/22-11-00141/>

*Список литературы*

1. Kivshar Y.S., Agrawal G.P. // Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals. Elsevier, 2003. P. 1–540.
2. Kudryashov N.A. // Optik. 2022. Vol. 261. P. 169163.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ С ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ

Проведены теоретические расчеты процессов сжатия и энерговыделения в мишени при сочетании с системой импульсных плазменных струй и интенсивного лазерного излучения в магнито-инерционном удержании плазмы. Получены результаты расчета комбинированного воздействия интенсивных потоков энергии на однослойную цилиндрическую мишень.

M.V. KUTYREV, V.V. KUZENOV

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

## INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE INTERACTION OF PLASMA BEAMS WITH A MAGNETIZED TARGET

The scheme of the interaction of plasma target with high energy pulse laser beams in the externally applied magnetic field, so-called laser-driven magneto-inertial fusion is considered [1-8]. A mathematical model of the interaction of high-energy-energy laser beams with a plasma target located in a seed magnetic field is developed by authors [9-16]. The theoretical calculations of the processes of compression and energy release in the target when combined with a system of pulsed jets and intense laser radiation in a magneto-inertial plasma confinement are carried out. The results of the calculation of the combined effect of intense energy flows on a single-layer cylindrical target have been obtained. Estimations of magnetized target compression and heating by high energy pulse laser beams for neutron and particle sources are presented [17-23].

Рассмотрена схема взаимодействия плазменной мишени с высокоэнергетичными импульсными лазерными пучками во внешнем магнитном поле, так называемый лазерный магнито-инерционный синтез [1-8]. Математическая модель взаимодействия высокоэнергетических лазерных пучков с плазменной мишенью, находящейся в затравочном магнитном поле, разработана авторами [9-16]. Представлены оценки сжатия и нагрева намагниченных мишеней высокоэнергетическими импульсными лазерными пучками для источников нейтронов и частиц [17-23].

Проведено численное моделирование, которое выявило сложный самосогласованный характер процессов передачи энергии от накопителя в плазму и процессов плазмообразования, динамики ускорения и взаимодействия потоков плазмы между собой и окружающим газом, и, в конечном счете, процессов преобразования диссипируемой в плазму энергии во внутреннюю и кинетическую энергии и в энергию широкополосного излучения, выходящего из плазмы разряда в окружающую газовую среду.

### *Список литературы*

1. Mozgovoy A.G., Romadanov I.V., Ryzhkov S.V. // *Physics of Plasmas*. 2014. V. 21. 022501.
2. Рыжков С.В., Чирков А.Ю. Системы альтернативной термоядерной энергетики. М.: Физматлит, 2017. 200 с.
3. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Physica Scripta*. 2021. V. 96. P. 125613.
4. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Fusion Science and Technology*. 2023. V. 79. P. 399-406.
5. Ryzhkov S.V. Magneto-Inertial Fusion and Powerful Plasma Installations (A Review) // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. P. 6658.
6. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Physics of Plasmas*. 2019. V. 26. P. 092704.
7. Кузенов В.В., Рыжков С.В. // *ТВТ*. 2021. Т. 59, № 4. С. 492–501.
8. Кузенов В.В., Рыжков С.В., Фролко П.А., Шумаев В.В. // *Труды МАИ*. 2015. № 82. С. 16.
9. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2018. V. 25 (2). P. 181-193.
10. Ryzhkov S.V. // *Fusion Science and Technology*. 2005. V. 47. № 2Т. P. 342–344.
11. Chirkov A.Yu., Ryzhkov S.V., Bagryansky P.A., et al. // *Plasma Physics Reports*. 2012. V. 38. P. 1025-1031.
12. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // *Mathematics*. 2022. V. 10. P. 2130.
13. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Gavrilova A.Yu., Skorokhod E.P. // *High Temperature Material Processes*. 2014. V. 18. P.119-130.
14. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Applied Physics*. 2014. № 3. P. 26-30.
15. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. // *Russian J. Nonlinear Dynamics*. 2019. V. 15, 4. P. 543-550.
16. Ryzhkov S. Reversed magnetic configuration & applications of high temperature plasma FRC // *Prikladnaia fizika*. 2010. 1. P. 47.
17. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V. *Computational Thermal Sciences*. 2021. V. 13. P. 45-56.
18. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. *Applied Sciences*. 2022. V. 12. P. 3610.
19. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // *Applied Sciences*. 2022. V. 12 (21). P. 11011.
20. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // *Applied Sciences*. 2023. V. 13 (9). P. 5538.
21. Shumeiko A.I., Telekh V.D., Ryzhkov S.V. // *Symmetry*. 2022. V. 14 (10). P. 1983.
22. Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. // *Aerospace*. 2023. V. 10. P. 662.
23. Клименко Г. К., Кузенов В. В., Ляпин А. А., Рыжков С. В. Учебник: Расчет, моделирование и проектирование генераторов низкотемпературной плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021. 264 с.

С.Ф. ЛАВРОВА, Н.А. КУДРЯШОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА ИЗ ИЕРАРХИИ КАУПА-НЬЮЭЛЛА В ПЕРЕМЕННЫХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ**

Рассмотрено уравнение в частных производных третьего порядка иерархии Каупа-Ньюэлла. Для получения соответствующего нелинейного обыкновенного дифференциального уравнения применяется редукция к переменным бегущей волны. Для исследования интегрируемости полученного уравнения используется критерий Пенлеве. Получены локальные разложения решения в ряд Пуазье в окрестности особой точки.

S.F. LAVROVA, N.A. KUDRYASHOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **TRAVELING WAVE SOLUTIONS OF THE THIRD ORDER PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATION FROM THE KAUP-NEWELL HIERARCHY**

The third-order partial differential equation of the Kaup-Newell hierarchy is considered. To obtain the corresponding nonlinear ordinary differential equation, reduction to the traveling wave variables is applied. To explore the integrability of the resulting equation, the Painlevé criterion is used. Local expansions of the solution into a Puiseux series in the neighborhood of a singular point are obtained.

Рассматривается уравнение в частных производных третьего порядка иерархии нелинейных уравнений в частных производных Каупа-Ньюэлла, имеющее следующий вид

$$iq_t + iq_{xxx} + 3q_x^2 q^* + 3q|q_x|^2 + 3|q|^2 q_{xx} - 3i|q|^2 q^2 q_x^* - \frac{9i}{2}|q|^4 q_x = 0.$$

Данное уравнение было получено с учетом обобщения пар Лакса, представленных в работе [1]. В ходе выполнения работы рассматриваемое уравнение в частных производных сведено к системе пятого порядка из двух обыкновенных дифференциальных уравнений при помощи перехода к переменным бегущей волны, так как исходное уравнение в частных производных допускает группы сдвига по переменным  $x$  и  $t$ . Было установлено, что полученная система уравнений не обладает свойством Пенлеве, потому что его решение имеет нецелую низшую степень разложения в ряд в окрестности особой точки. Однако, была проведена проверка рассматриваемой системы дифференциальных уравнений на слабое свойство Пенлеве. Получено, что рассматриваемая система уравнений обладает слабым свойством Пенлеве и имеет локальные решения с пятью произвольными постоянными в форме разложений в ряд Пуазье по полужелым степеням  $z - z_0$  в окрестности особой точки.

### *Список литературы*

1. Kaup D.J., Newell A.C. // J. Math. Phys. 1978. Vol. 19, № 4. P. 798–801.

## ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ПОСТРОЕНИЯ НЕРЕГУЛЯРНЫХ СЕТОК ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧ КОНВЕКЦИИ-ДИФФУЗИИ

В данной работе исследуется задача с уравнением конвекции-диффузии в многомерном пространстве. Авторы представляют алгоритм построения нерегулярной сетки, который использует свойства квазислучайной последовательности для удовлетворения условия монотонности. Этот алгоритм позволяет эффективно генерировать сетки для различных коэффициентов конвекции и диффузии, и может быть обобщён для нестационарных уравнений.

S.A. LADYGIN, R.N. KARACHURIN, K.E. SHILNIKOV, P.N. RYABOV  
 National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## ON A METHOD OF CONSTRUCTING IRREGULAR GRIDS FOR SOME CONVECTION-DIFFUSION PROBLEMS

This work investigates a problem with a convection-diffusion equation in multidimensional space. The authors present an algorithm for constructing an irregular grid that uses the properties of a quasi-random sequence to satisfy the monotonicity condition. This algorithm allows for efficient generation of grids for various convection and diffusion coefficients and can be generalized for non-stationary equations.

Рассмотрим задачи с уравнением конвекции-диффузии:

$$\begin{cases} (D + C)u(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}), & \mathbf{x} = (x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(d)}) \in \Omega \in \mathbb{R}^d, \\ u(\mathbf{x}) = 0, & x \in \partial\Omega. \end{cases}$$

Здесь  $Du = -\nabla \cdot (k(\mathbf{x})\nabla u)$  – оператор диффузионного переноса,  $C$  – оператор конвективного переноса, который рассматривается в двух формах: недивергентная  $C_1 u = \mathbf{v}(\mathbf{x}) \cdot \nabla u$  и дивергентная  $C_2 u = \nabla \cdot (\mathbf{v}(\mathbf{x})u)$ . В качестве расчётной области  $\Omega$  выбирается  $d$ -мерный прямоугольный параллелепипед.

Существует известное достаточное условие монотонности (которое представляет собой более строгое требование, чем простая устойчивость) для классической разностной схемы, полученной методом конечных объемов [1]:

$$Pe \equiv \frac{|\mathbf{v}_{ij}|d_{ij}}{k_{ij}} < 2, \quad (i, j) \in E. \quad (1)$$

Здесь  $\mathbf{v}_{ij}$  и  $k_{ij}$  – значения коэффициентов конвективного и диффузионного переносов в середине отрезка, соединяющего узлы  $i$  и  $j$ ,  $d_{ij}$  – евклидово расстояние между узлами  $i$  и  $j$ ,  $E$  – множество рёбер сетки. Слева в данном неравенстве представлено так называемое сеточное число Пекле.

С использованием свойств квазислучайной последовательности  $R_d$ [2] был разработан алгоритм построения нерегулярной сетки, удовлетворяющей достаточному условию монотонности (1) (см. Рис. 1). Алгоритм построения использует условие, которое либо принимает, либо отсекает следующую точку последовательности, что делает данный алгоритм эффективным с точки зрения времени выполнения.

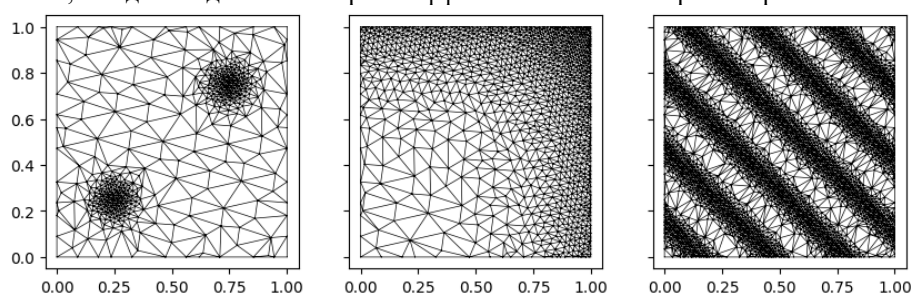


Рис. 1. Примеры сеток для разных коэффициентов конвекции и диффузии.

Следует отметить, что данный алгоритм легко обобщается на нестационарные уравнения, где сетка строится отдельно для каждого временного слоя.

### Список литературы

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. — 2003.
2. Roberts M. The unreasonable effectiveness of quasirandom sequences //Extreme Learning. — 2018. — С. 04–25

Е.В.КОРОТКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## ДИСПЕРСНЫЕ ПОВТОРЫ В ГЕНОМАХ БАКТЕРИЙ

Разработан математический метод который позволяет находить в геномах бактерий сильно дивергировавшие дисперсные повторы. Были обнаружены дисперсные повторы в бактериях из всех известных семейств, всего было изучено 42 бактериальных генома. Длины повторов составляют около 500 оснований ДНК и они суммарно занимают от 30 до 60 процентов генома бактерии. Повторы наложены на гены бактерий в виде мотива.

E.V.KOROTKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## DISPERSED REPEATS IN BACTERIAL GENOMES

A mathematical method has been developed that allows one to find highly divergent dispersed repeats in bacterial genomes. Dispersed repeats were discovered in bacteria from all known families; a total of 42 bacterial genomes were studied. The length of the repeats is about 500 DNA bases and they together occupy from 30 to 60 percent of the bacterial genome. Repeats are superimposed on bacterial genes in the form of a motif.

Мы разработали новый метод (IP метод) поиска дисперсных повторов в разнообразных геномах (Korotkov et al. 2023). Этот метод позволяет найти дисперсные повторы в любом геноме в том случае, когда среднее число замен между любыми двумя повторами в расчета на одно основание (x) ДНК будет меньше 1.7. Все ранее разработанные методы поиска дисперсных повторов (RED, RECON или Repeat\_masker и многие другие) могут найти дисперсные повторы только для  $x \leq 1.0$ . Это означает, что впервые появилась возможность проверить существование семейств повторов в интервале  $1.0 \leq x \leq 1.7$  в прокариотических геномах. Мы применили IP метод для поиска дисперсных повторов в геномах 39 бактерий случайно выбранных из всех известных типов (phyla) бактерий. Полученные результаты показывают, что геном каждой из изученных бактерий содержат сильно дивергировавшее семейство повторов с числом копий от 103 для генома *Spiriplasma poulsonii* до 14383 для генома *Gemmata obscuriglobus*. Повторы занимают от 30% до 60% бактериальных геномов и более 90% повторов наложены как мотив на кодирующие последовательности. Длины найденных дисперсных повторов лежат в интервале от 450 до 580 оснований в зависимости от генома бактерии. Поиск повторов в случайно перемешанных геномах показал, что число ложных позитивов для полученных результатов менее 1%.

Мы сформировали также консенсусные последовательности для повторов из каждой бактерии при помощи программы Weblogo. Эти консенсусы показывает, что обнаруженные повторы внутри семейства слабо подобны друг другу, но в них встречается достаточно много небольших участков длиной 3-5 оснований или отдельных позиций, где наблюдается почти 100% подобие. Можно сказать, что повторы содержат консервативные островки которые чередуются слабо подобными районами.

Мы предполагаем, что найденные в работе дисперсные повторы могут быть участками связывания различных нуклеоид-ассоциированных белков и способствовать свертке бактериальной ДНК в nucleoid (Verma et al. 2019). Также можно думать, что обнаруженные семейства повторов могут принимать участие в создании жидкокристаллической структуры в составе ДНК бактерии (Yevdokimov et al. 2009).

### *Список литературы*

1. Korotkov E, Suvorova Y, Kostenko D, Korotkova M. 2023. Search for Dispersed Repeats in Bacterial Genomes Using an Iterative Procedure. *Int J Mol Sci* 24: 10964. <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/13/10964/html>



Д.О. КОСТЕНКО, Е.В. КОРОТКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
ФИЦ «Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва, Россия

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА MAHDS ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МНОЖЕСТВЕННЫХ ВЫРАВНИВАНИЙ СЛАБО ГОМОЛОГИЧНЫХ БЕЛКОВЫХ СЕМЕЙСТВ

Рассмотрены основные проблемы, связанные с построением множественных выравниваний символьных последовательностей (MSA). Представлена концепция разработанного нами метода построения MSA - MAHDS. Проведено комплексное сравнение MAHDS с другими методами в контексте выравнивания аминокислотных последовательностей. Показана способность MAHDS строить уникальные статистически значимые MSA слабо гомологичных белковых семейств.

D.O. KOSTENKO, E.V. KOROTKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Research Center of Biotechnology RAS, Moscow, Russia

## APPLICATION OF THE MAHDS METHOD FOR MULTIPLE ALIGNMENT OF WEAKLY HOMOLOGOUS PROTEIN FAMILIES

The main difficulties related to the multiple sequence alignment (MSA) problem are considered. The concept of the MAHDS method developed is presented. A comprehensive comparison of MAHDS with other methods has been conducted in the context of protein sequences. The ability of MAHDS to obtain unique statistically significant MSAs of weakly homologous protein families has been shown.

Множественное выравнивание последовательностей (MSA) ДНК/РНК и белков является одной из важнейших задач биоинформатики. Эта задача не имеет идеального решения, так как она является NP-полной, то есть время необходимое для получения её точного решения экспоненциально зависит от количества последовательностей. Это не позволяет использовать известный математический метод построения MSA на практике более чем для 2 последовательностей. В качестве альтернативы обычно применяется прогрессивный подход, подразумевающий построение филогенетического дерева и попарное выравнивание наиболее подобных последовательностей с последующим слиянием этих выравниваний. Недостатком такого подхода является накопление ошибок, допускаемых в парных выравниваниях, что сильно снижает качество MSA для сильно дивергированных последовательностей.

В статье [1] мы представили метод MAHDS, не использующий прогрессивный подход. Была разработана обратимая процедура преобразования позиционно-весовых матриц (PWM) в MSA. Таким образом построение MSA сводится к задаче оптимизации PWM, где целевой функцией является статистическая значимость ( $Z$ ). Такой подход позволяет обнаруживать подобие и строить статистически значимые MSA последовательностей, накопивших большое количество мутаций. В [1] было показано, что MAHDS способен построить статистически значимое MSA последовательностей, накопивших друг относительно друга по  $x = 4.4$  случайных замен на нуклеотид (для методов ClustalW, MAFFT, T-Coffee, Kalign и Muscle этот показатель:  $x < 2.5$ ). В работе [2] метод MAHDS был адаптирован для выравнивания аминокислотных последовательностей. Было показано, что в этом случае статистически значимые MSA с помощью MAHDS можно получить до  $x = 4.8$  замен на аминокислоту, в то время как для методов T-Coffee, MUSCLE, Clustal Omega, Kalign, MAFFT и PRANK  $x < 2.4$ . Также MAHDS показал наилучшие результаты по критерию  $Z$  при приемлемых результатах по CS при тестировании на базе эталонных выравниваний BALiBASE.

Для данной работы программная реализация MAHDS была улучшена и применена для выравнивания белковых семейств из базы Pfam. Были выбраны все семейства с идентичностью  $\leq 20\%$ , с учётом технических ограничений сервисов EMBL-EBI. Для 490 выбранных семейств были построены MSA методами MAHDS, MUSCLE и T-Coffee (эти методы ранее показали наилучшие результаты) и оценены их значения  $Z$  (порог значимости  $Z_t = 11$ ).

Таблица 1. Результаты оценки  $Z$  для MSA полученных методами MAHDS, MUSCLE и T-Coffee для выбранных семейств Pfam.

	Среднее значение $Z$	Статистически значимых выравниваний (из 490)	Выравниваний с наибольшим $Z$ (из 490)	Уникальных значимых выравниваний (из 490)
MAHDS	141.99	480	483	138
MUSCLE	47.81	344	7	2
T-Coffee	-136.16	96	0	0

Как видно из таблицы, исключительно методом MAHDS можно построить отличающиеся от случайных множественные выравнивания для 138 из 490 рассмотренных слабо гомологичных белковых семейств.

### Список литературы

1. Korotkov, E. V., Suvorova, Y. M., Kostenko, D. O., & Korotkova, M. A. (2021). Multiple Alignment of Promoter Sequences from the Arabidopsis thaliana L. Genome. Genes, 12(2), 135.
2. Kostenko, D. O., & Korotkov, E. V. (2022). Application of the MAHDS Method for Multiple Alignment of Highly Diverged Amino Acid Sequences. International journal of molecular sciences, 23(7), 3764.

А.О. КАЗАЧИНСКИЙ, И.Ю. КРУТОВА

*Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
Снежинск, Россия*

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ ТИПА ТОРНАДО ПРИ УЧЕТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ ТЯЖЕСТИ И КОРИОЛИСА**

Исследование посвящено численному моделированию математической модели для исследования сложных течений политропного газа в восходящих закрученных потоках воздуха. В модели детально рассматриваются процессы возникновения и развития трехмерного стационарного движения воздуха, при инициировании закрутки потока силой Кориолиса – являющейся инерционной силой, возникающей от вращения Земли вокруг своей оси.

A.O. KAZACHINSKIY, I.Y. KRUTOVA

*Snezhinsky Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University "MEPhI", Snezhinsk, Russia*

## **ANALYTICAL MODELING OF NONSTATIONARY TORNADO-TYPE CURRENTS WHEN CONSIDERING THE ACTION GRAVITY AND CORIOLIS FORCES**

An interesting phenomenon is quite common in nature - an ascending swirling stream of air. Examples of such streams are numerous tornadoes and tornadoes that are regularly observed in the southern United States and in other fairly warm and flat areas. Such phenomena include periodic tropical cyclones, as well as fire whirlwinds, often observed during the season of agricultural burns.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью понимания сути физических процессов, происходящих в восходящих потоках, необходимость тщательного и глубокого изучения природы возникновения вихрей (торнадо, смерчи, тропический циклон) для раннего предупреждения и эффективной борьбы с их разрушительными последствиями.

Для выбранной математической модели в виде системы уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса поставлены начальные условия, позволяющие численно находить решения для описания стационарного трехмерного течения газа в восходящих закрученных потоках.

Предложенная математическая модель позволяет дать оригинальную трактовку причины возникновения закрутки воздуха соответствующего направления. С помощью численного метода характеристик численно найдены решения для коэффициентов рядов, которые определяются через систему уравнений газовой динамики с учетом действия сил тяжести и Кориолиса, которая описывает трехмерное нестационарное придонное течение политропного газа в восходящих закрученных потоках.

В представленной модели трехмерного течения политропного газа представлен анализ и исследование коэффициентов сходящихся рядов для газодинамических параметров различных классов по данным натурных наблюдений, которые повторяют природное явление. Кроме того, рассчитаны мгновенные линии тока для нестационарного случая трехмерного течения политропного газа.

### *Список литературы*

1. Баутин С.П., Крутова И.Ю., Обухов А.Г. Газодинамическая теория восходящих закрученных потоков. – Екатеринбург: УрГУПС, 2020. – 399 с.
2. Баутин С.П., Крутова И.Ю. Аналитическое и численное моделирование течений газа при учете действия силы Кориолиса. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 181 с.
3. Казачинский А.О., Крутова И.Ю. Построение течений в придонной части восходящих закрученных потоков как решение одной характеристической задачи Коши : Препринт. – Снежинск : издательство СФТИ НИЯУ МИФИ, 2016. – 60 с.

С.Г. КЛИМАНОВ<sup>1</sup>, А.В. КРЯНЕВ<sup>1,2</sup>, В.А. ТРИКОЗОВА<sup>1</sup>, Д.Д. ЦАРЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

## ВЫЯВЛЕНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ЗНАЧЕНИЯХ ТЕКУЩИХ ПОКАЗАНИЙ ПАЦИЕНТА ПРИ ИСКУССТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЛЕГКИХ (ИВЛ)

Рассматривается проблема выявления аномальных выбросов и нивелирования их отрицательного влияния на выделяемые значимые характеристики рассчитываемых показателей, необходимых для принятия оптимальных значений параметров вентиляционного потока, обеспечивающих наиболее эффективное лечение пациента. Для решения поставленной задачи в статье рассматриваются и применяются несколько так называемых робастных методов и основанных на них вычислительных схем выделения аномальных выбросов в значениях показателей состояния пациента и определения их будущих значений

S.G. KLIMANOV<sup>1</sup>, A.V. KRYANEV<sup>1,2</sup>, V.A. TRIKOZOVA<sup>1</sup>, D.D. TSAREVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980, Russia

## DETECTION OF ANOMAL EMISSIONS IN THE VALUES OF CURRENT INDICATIONS OF A PATIENT DURING ARTIFICIAL VENTILATION

The problem of identifying abnormal emissions and leveling their negative impact on the identified significant characteristics of the calculated indicators necessary for adopting optimal values of ventilation flow parameters that ensure the most effective treatment of the patient is considered. To solve this problem, the article considers and applies several so-called robust methods and computational schemes based on them for identifying anomalous outliers in the values of indicators of the patient's condition and determining their future values

Важной задачей длительной ИВЛ является постоянное поддержание оптимальных режимов вентиляции [1-3]. Одной из основных задач вычислительного комплекса программного обеспечения ИВЛ является определение оптимальных значений параметров вентилирующего потока аппарата ИВЛ в зависимости от значений параметров, характеризующих текущее состояние пациента. В статье приведены части алгоритмов, реализующих решение вышеуказанной основной вычислительной задачи, а именно приведена математическая схема и алгоритм выявления и фильтрации аномальных выбросов [4]. Математически эта задача сводится к выделению из совокупности зашумленных значений исследуемой функциональной зависимости аномальных выбросов. Представлен универсальный метод, который позволяет выделять из рассматриваемой совокупности значений аномальные выбросы, в том числе в динамическом режиме. На рис. 1 представлены исходные фиксируемые значения во времени показателя «Максимальное давление в дыхательных путях во время вдоха» (рис. 1), на рис.2 отфильтрованные значения этого показателя.

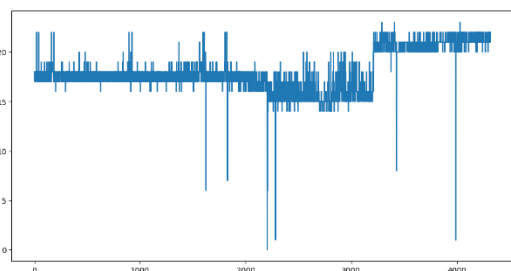


Рис.1

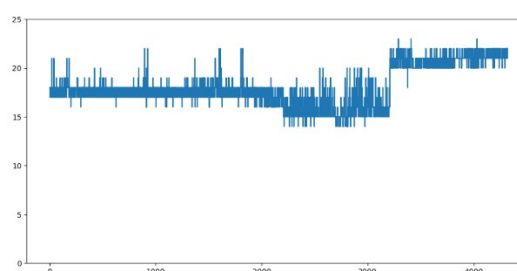


Рис.2

### Список литературы

1. Е.П. Ананьев, А.А. Полупан, И.В. Мацковский [и др.] Использование режима IntelliVent-ASV для поддержания целевого диапазона EtCO<sub>2</sub> у пациентов с тяжелой ЧМТ // Журнал «Вопросы нейрохирургии» имени Н.Н. Бурденко. – 2017. – Т. 81 (5). – С. 63-68.
2. Artificial intelligence and machine learning show promise in cancer diagnosis and treatment // Medical Xpress : сайт. – URL: <https://medicalxpress.com/news/2022-03-artificial-intelligence-machine-cancer-diagnosis.html>.
3. Ивахно Н.В., Минаков Е.И., Федоров С.С., Анцибор С.В. Математическое моделирование процессов в биотехническом комплексе «Аппаратура корректирующего воздействия - дыхательная система человека» // Вестник новых медицинских технологий. Электронное издание. 2015. №4.
4. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 308 с.

А.Е. КУВШИННИКОВ

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПЛАСТИНЫ РАЗРЫВНЫМ МЕТОДОМ ЧАСТИЦ

Рассмотрено применение разрывного метода частиц к задаче образования пограничного слоя при обтекании пластины сверхзвуковым потоком вязкого газа. На примере этой задачи показана возможность решения двумерных задач газовой динамики с большим вкладом диффузии. Проведено сравнение с имеющейся оценкой толщины пограничного слоя.

A.E. KUVSHINNIKOV

Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russia

## MODELLING OF THE APPEARANCE OF A BOUNDARY LAYER DURING FLOW AROUND A PLATE BY THE DISCONTINUOUS PARTICLE METHOD

The application of the discontinuous particle method to the problem of boundary layer formation when a supersonic viscous gas flow flows around a plate is considered. The capability of solving two-dimensional problems of gas dynamics with a large contribution of diffusion is shown. A comparison is made with the available estimates of the thickness of the boundary layer.

Методы частиц являются альтернативой классическим разностным методам в численном моделировании [1]. Они основаны на лагранжевом подходе, где система описывается в терминах движущихся частиц. Один из известных методов частиц — это метод сглаженных частиц (SPH) [2].

В случае разрывного метода частиц [3] задача формулируется как система обыкновенных дифференциальных уравнений. Плотность среды представляется в виде суммы дельта-функций, аппроксимированных функциями-прямоугольниками для удобства вычислений. На этапе предиктора центры частиц сдвигаются согласно уравнению движения, на этапе корректора происходит перестройка частиц исходя из требуемого постоянного объема частицы (без учёта сил давления, диффузии и внешних сил). Однако такое представление в случае многомерных расчётов потребляет слишком много вычислительных ресурсов. В связи с этим вводится новый инвариант, который можно понимать как закон сохранения массы в области между двумя наиболее активно взаимодействующими частицами, что сводит этап корректора к локальному одномерному распространению возмущения. Частицы представляются в виде множества отрезков с высотами, равными величине искомой функции в центре частицы. Инвариантом является площадь трапеции, основаниями которой являются частицы, а сторонами — отрезок, соединяющий центры частиц на плоскости, и отрезок, соединяющий вершины.

Данным методом решается задача образования пограничного слоя при обтекании пластины сверхзвуковым потоком вязкого газа. Показывается, что разрывный метод частиц воспроизводит качественную структуру течения (рис. 1). Также сравнивается количественная характеристика, толщина пограничного слоя. Для улучшения результатов предполагается использование механизма «рождения-гибели» частиц, хорошо показавшего себя в решении аналогичной задачи с несжимаемой жидкостью [1]. Вычисления проведены с помощью гибридного суперкомпьютера K100, установленного в Суперкомпьютерном Центре коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

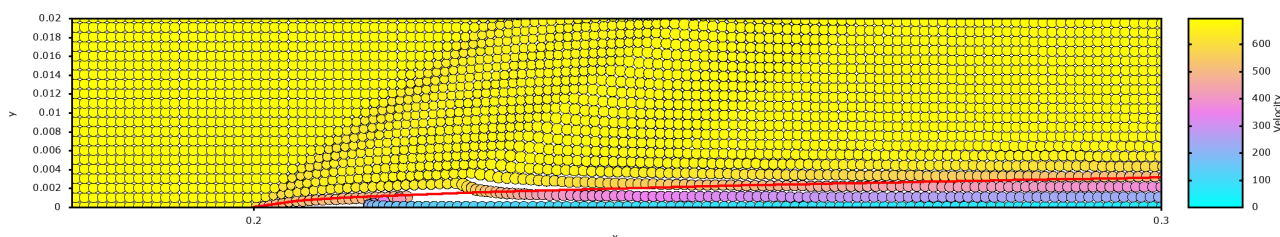


Рис. 1. Распределение продольной компоненты скорости

### Список литературы

1. Богомолов С.В. Метод частиц. Несжимаемая жидкость // Матем. моделирование. 2003. Т.15, №1, С. 46–58.
2. Liu G. R., Liu M. B. Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method, World Scientific Publishing, 2003.
3. Bogomolov S.V., Bondarev A.E., Kuvshinnikov A.E. Comparative verification of numerical methods involving the discontinuous shapeless particle method // Scientific Visualization. 2022. V. 13, № 4, P. 97–109.

**Т.Р. КАЛИМУЛЛИН<sup>1</sup>, Е.В. СТЕПИН<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ МГД-ТЕЧЕНИЙ В КОАКСИАЛЬНЫХ КАНАЛАХ ПЛАЗМЕННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ВО ВНЕШНЕМ ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Объектом моделирования работы являются двумерные осесимметричные МГД-течения плазмы в канале ускорителя в форме сопла, образованного двумя коаксиальными электродами, подключенными к внешнему источнику электрического тока. Плазма рассматривается как сплошная электропроводящая среда, описываемая в терминах магнитной газодинамики. В ходе исследования были получены результаты о влиянии внешнего продольного магнитного поля на ускорительные характеристики канала. Программный код распараллелен для уменьшения времени вычисления.

**T.R. KALIMULLIN<sup>1</sup>, E.V. STEPIN<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences

## **NUMERICAL SIMULATION OF TWO-DIMENSIONAL MHD-FLOWS IN COAXIAL CHANNELS OF PLASMA ACCELERATORS IN AN EXTERNAL LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD USING PARALLEL PROGRAMMING TECHNOLOGIES**

The object of the simulation is two-dimensional axisymmetric MHD plasma flows in the accelerator channel in the form of a nozzle formed by two coaxial electrodes connected to an external electric current source. Plasma is treated as a continuous electrically conductive medium described in terms of MHD. In the course of the study, results were obtained on the effect of an external longitudinal magnetic field on the acceleration characteristics of the channel. The program code is parallelized to reduce the calculation time.

Плазменные двигатели уже используются в космических аппаратах для стабилизации, ориентирования и корректировки полета, однако их более мощные разновидности, работающие на принципе ускорения плотной горячей плазмы в скрещенных электрических и магнитных полях, могут применяться для маршевого движения в космическом пространстве. Примером таких устройств является квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель (КСПУ), предложенный А.И. Морозовым [1, 2] и в настоящее время разрабатываемый в АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» [3].

Объектом моделирования настоящей работы являются течения плазмы в канале ускорителя в форме сопла, образованного двумя коаксиальными электродами. Плазма рассматривается как сплошная электропроводящая среда, поведение которой описывается в терминах магнитной газодинамики (МГД) [4], при этом диссипативные эффекты (газовая и магнитная вязкости, теплопроводность) пренебрегаются. В работе используется модель с нестационарными уравнениями «идеальной» одножидкостной магнитной газодинамики.

Развивая предыдущие исследования об ускорении плазмы в узких трубках в терминах квазиодномерной модели [5], в работе было изучено влияние внешнего продольного магнитного поля на осесимметричные МГД-течения в коаксиальных каналах в двумерной постановке. В качестве метода расчета была выбрана схема Лакса-Фридрихса. Вычисления производились на кластере Центра инженерно-физических расчетов и суперкомпьютерного моделирования НИЯУ МИФИ.

В ходе исследования в терминах вычислительного эксперимента были получены зависимости макроскопических параметров ускоряемого плазменного потока для различных значений физических характеристик задачи. Представлена их визуализация и дана прикладная интерпретация. Было исследовано влияние внешнего продольного магнитного поля на двумерное осесимметричное МГД-течение в каналах плазменных ускорителей. Научная новизна работы состоит в применении технологии распараллеливания для уменьшения временных затрат на расчет поставленных задач и в исследовании процесса установления рассматриваемого режима течения в различных геометриях ускорителя в присутствии продольного поля.

### *Список литературы*

1. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику // М.: Физматлит, 2008. 616 с.
2. Волков Я.Ф., Кулик Н.В., Маринин В.В., Морозов А.И., Соляков Д.Г., Стальцов В.В., Терешин В.И., Тиаров М.А., Цупко Б.Ю., Чеботарев В.В. Анализ параметров потоков плазмы, генерируемых полноблочными КСПУ X-50 // Физика плазмы, 1992. Т.18. С.1392.
3. Климов Н.С., Гуторов К.М., Коваленко Д.В., Козлов А.Н., Коновалов В.С., Подковыров В.Л., Ярошевская А.Д. Спектры излучения в потоках ионизирующихся газов для установки КСПУ-Т с продольным полем // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша, 2022. № 12. 32 с.
4. Брушлинский К.В. Математические основы вычислительной механики жидкости, газа и плазмы. // Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2017.
5. Калимуллин Т.Р., Степин Е.В. Численное моделирование трансзвуковых сверхальфеновских МГД-течений с ускорением в узких коаксиальных каналах в присутствии продольного магнитного поля // Вестник национального исследовательского ядерного университета "МИФИ", 2023. Т.12. № 4. С. 233-242.

В.Л. КАМЫНИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСЯЩЕГО ОТ $x$ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ В МНОГОМЕРНОМ НЕРАВНОМЕРНО ПАРАБОЛИЧЕСКОМ УРАВНЕНИИ

Доказаны теоремы существования и единственности решения обратной задачи определения зависящего от  $x$  неизвестного младшего коэффициента в вырождающемся параболическом уравнении со многими независимыми переменными. В качестве дополнительного условия задается условие интегрального наблюдения. Приведен пример обратной задачи, для которой выполняются условия доказанных в работе теорем.

V.L. KAMYININ

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INVERSE PROBLEM OF DETERMINING THE $x$ -DEPENDENT ABSORPTION COEFFICIENT IN A MULTIDIMENSIONAL NONUNIFORMLY PARABOLIC EQUATION

We prove existence and uniqueness theorems for inverse problems of determining the  $x$ -dependent unknown lower coefficient in a nonuniformly parabolic equation with many independent variables. The additional condition is given in the form of integral observation. An example of an inverse problem is given for which the conditions of the theorems proved are satisfied.

Изучается существование и единственность обобщенного решения  $\{u(t, x), \gamma(x)\}$  обратной задачи для параболического уравнения

$$\rho(t, x)u_t - \Delta u + (\bar{b}(x), u_x) + c(t, x)u + \gamma(x)u = f(t, x), \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$u(t, x) = \Psi(t, x), (t, x) \in \Gamma, \quad (2)$$

и дополнительным условием интегрального наблюдения

$$\int_0^T u(t, x)\chi(t)dt = \varphi(x). \quad (3)$$

Здесь  $(t, x) \in Q = [0, T] \times \Omega$ ,  $\Omega$  - ограниченная область в  $n$ -мерном пространстве с гладкой границей  $\partial\Omega$ ,  $\Gamma$  - «параболическая граница» области  $\Omega$ .

Особенностью постановки обратных задач является предположение о том, что уравнение (1) не является равномерно параболическим, а именно, для него выполнено условие

$$0 \leq \rho(t, x) \leq \rho_1, \frac{1}{\rho(t, x)} \in L_q(Q), q > 1.$$

Установлены достаточные условия, при которых решения обратной задачи (1)-(3) существует и единственно. Приведены примеры, показывающие, что такие условия выполняются, если  $T$  достаточно велико (при фиксированном объеме области  $\Omega$ ), либо если объем области  $\Omega$  достаточно мал (при фиксированном  $T$ ).

Отметим, что ранее аналогичные результаты для обратной задачи восстановления младшего коэффициента уравнения (1) при дополнительном условии (3) были установлены для случая одной пространственной переменной в [1]. В работе [2] в случае многомерного уравнения вида (1) при дополнительном условии (3) была исследована обратная задача восстановления правой части уравнения.

### Список литературы

1. А. И. Прилепко, В. Л. Камынин, А. В. Костин // J. Inverse Ill-Posed Probl. 2018. Vol. 26, N 4, P. 523-539.
2. Камынин В.Л. // Матем. Заметки. 2022. Т. 112, № 3, С. 398-411

О.В. КАПЦОВ

*Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия*

## **ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ СИСТЕМЫ И МЕТОД ИНТЕГРИРОВАНИЯ МОНЖА-АМПЕРА**

Рассматриваются некоторые классические и новые методы интегрирования уравнений с частными производными. Кратко описываются подходы Монжа и Дарбу. Приводятся примеры построения общих решений уравнений второго порядка, основанные на инвариантах характеристик гиперболических уравнений. В терминах дифференциальной алгебры вводятся промежуточные системы уравнений в частных производных. Найдены уравнения, обладающие промежуточными системами.

O.V. KAPTSOV

*Institute of Computational Modelling, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

## **INTERMEDIATE SYSTEMS AND MONGE-AMPERE INTEGRATION METHOD**

In this report some classical and new methods of integration of partial differential equations are considered. The approaches of Monge and Darboux are briefly described. Examples of the construction of general solutions of second order equations based on invariants of the characteristics of hyperbolic equations are given. Intermediate systems of partial derivative equations are introduced in terms of differential algebra. Equations possessing intermediate systems are found.

Первые методы интегрирования линейных уравнений второго порядка, как описано в историко-математических исследованиях, возникли в восемнадцатом веке в работах Эйлера и Даламбера. Видимо Монж первым придумал метод интегрирования некоторых нелинейных уравнений выше первого порядка. Он предложил аналог первых интегралов из теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Ему удалось найти общие решения уравнений, возникающих в дифференциальной геометрии. Позднее, Ампер и Дарбу развили метод Монжа, рассматривая дополнительные уравнения совместные с исходным уравнением. Метод Дарбу привлекал большое внимание в работах французских математиков в конце девятнадцатого и начале двадцатого века. Подробное описание этих методов дано в монографиях [1]. Следует также отметить хорошо известные работы С. Ли, оказавшие большое влияние на математическую физику. Потом интерес к аналитическим методам интегрирования упал, но затем вновь возник в 60-ых годах XX века. Групповые методы в исследовании уравнений с частными производными получили новый импульс [2]. В тоже время, возник большой интерес к теории солитонов, развиваемой многочисленными авторами.

В данном докладе дается краткое описание методов Монжа и Дарбу. Приводится ряд примеров уравнений с частными производными второго порядка интегрируемых этими методами. Вводится понятие промежуточных систем уравнений. Даны примеры уравнений, обладающих промежуточными системами, большая часть таких уравнений обладает высшими симметриями. Следуя работам [3], определяются понятие инвариантов характеристик гиперболических уравнений. Указана связь инвариантов с промежуточными уравнениями. Построены примеры частных интегралов, заданные линейными определяющими уравнениями.

Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2023-912).

### *Список литературы.*

1. Forsyth A.R. Theory of differential equations. Part IV. Partial differential equations. Vol VI. Cambridge: University Press. 1906.
2. Овсянников Л. В. Групповой анализ дифференциальных уравнений. М.: Наука, 1978.
3. Капцов О.В. Методы интегрирования уравнений с частными производными. М.: Наука, 2016

## АВТОНОМНОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ АНСАМБЛЕЙ ДРОНОВ

Разработан закон управления, позволяющий трем точкам собраться в формуацию, образующую правильный треугольник с заданной стороной и произвольными расположением и ориентацией. Решена задача о приведении трех материальных точек на плоскости к равностороннему треугольнику и написана программа, позволяющая визуализировать поведение агентов на плоскости.

A.L. KIRSANOV, A.S. MATVEEV

Sirius University, Sirius, Russia

## AUTONOMOUS CONFIGURATION OF DRONE ENSEMBLES

A control law has been developed that allows three points to assemble into a formation forming a regular triangle with a given side and arbitrary location and orientation. The problem of reducing three material points on the plane to an equilateral triangle has been solved and a program has been written that allows you to visualize the behavior of agents on the plane.

Образование формаций в многоагентных системах является первостепенной задачей. Прежде чем несколько агентов смогут начать выполнять поставленное задание им необходимо «сбиться в стаю». Основные преимущества таких систем в том, что все агенты автономны, наделены одинаковыми полномочиями, управляются единым законом, у них отсутствует иерархия и системы связи, каждый из агентов не имеет полной информации о других, а доступные ему сенсорные данные локальные.

Задача формулируется следующим образом, на плоскости произвольным образом берутся три точки – это агенты, которые управляются вектором скорости, ограниченным по величине заданной константой. Агенты знают, на каком удалении друг от друга они должны собраться, поскольку известна сторона целевого треугольника. Кроме того, агенты могут находить координаты других агентов в своей связанной системе отчета. В физическом мире это достигается с помощью различной измерительной аппаратуры или навигационных приборов.

Перед началом выполнения алгоритма, каждый агент производит расчет расстояния  $\rho$  от вершин до центра целевого треугольника в зависимости от заданной стороны целевого треугольника. После этого, в каждый момент времени каждый агент:

1. Определяет в связанной системе отчета положение других агентов.
2. Рассчитывает координаты центра масс треугольника, вершинами которого являются другие агенты.
3. Проводит прямую, проходящую через начало координат связанной системы и точку, полученную в п.2 и рассчитывает азимуты других объектов
4. Продолжает движение до тех пор, пока не сравняются по модулю азимуты двух других объектов и расстояние до центра масс не станет равным  $\rho$

Следуя этой схеме, агенты соберутся на окружности с радиусом  $\rho$  и будут отсекают собою равные дуги на этой окружности, что равносильно расположению в вершинах равностороннего треугольника. Разложим скорость каждого агента на два ортогональных вектора, где первая составляющая отвечает за сближение с центром масс:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sin(a) * \text{sign}(-d) * u_1 \\ \dot{y} &= \cos(a) * \text{sign}(-d) * u_1\end{aligned}$$

Вторая составляющая отвечает за сравнение по модулю азимутов других двух агентов:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \cos(a) * \text{sign}(k) * u_2 \\ \dot{y} &= -\sin(a) * \text{sign}(k) * u_2\end{aligned}$$

$a$  – угол между горизонтальной прямой и прямой, проходящей через центр масс и агента,  
 $d$  - разница между расстоянием от агента до центра масс и расстоянием  $\rho$ ,  $k$  - разница между азимутами двух других агентов;  $u_1^2 + u_2^2 = u^2$ , где  $u$  - желаемая скорость движения агента.

### Список литературы

1. Spears, W. M., and Gordon, D. F. (1999). "Using artificial physics to control agents" in Proceedings of the 1999 International Conference on Information Intelligence and Systems (ICIIS 1999) (IEEE), 281–288. doi:10.1109/ICIIS.1999.810278



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ ЖИДКОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЕСЕННЫХ СЕТОК

В данной работе описана математическая модель для трехмерного моделирования растекания жидкости с учетом произвольного рельефа дна на основе двумерных уравнений мелкой воды (УМВ). Представлено её численное решение, полученное с использованием разностной аппроксимации УМВ на разнесенной сетке, а так же методом Лакса-Вендроффа. Приводится сравнение представленных методов на примере решения задачи об обрушении водяной колонны в замкнутом бассейне.

A.M. KIRSANOVA<sup>1</sup>, A.A. DANILOV<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Sirius University of Science and Technology, Sirius, Russia

<sup>2</sup>INM RAS, Moscow, Russia

## SIMULATION OF FLUID FLOW USING STAGGERED GRID

This paper describes a mathematical model for three-dimensional modeling of liquid spreading taking into account arbitrary bottom topography based on two-dimensional shallow water equations (SWE). Its numerical solution is presented, obtained using the difference approximation of the SWE on a staggered grid, as well as the Lax-Wendroff method. A comparison of the presented methods is given using the example of solving the problem of the collapse of a water column in a closed pool.

Решение задач, связанных с растеканием жидкости очень актуально [1]. Модифицированная система уравнений мелкой воды имеет вид  $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0$ ,  $\frac{\partial u}{\partial t} + u \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right) + g \left(\frac{\partial(h+b)}{\partial x}\right) = 0$ ,  $\frac{\partial v}{\partial t} + u \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) + g \left(\frac{\partial(h+b)}{\partial y}\right) = 0$ , где  $b = b(x, y)$  – функция, задающая рельеф дна,  $h$  – высота профиля водной поверхности над дном,  $u, v$  – скорости жидкости в направлении  $x$  и  $y$  соответственно. Для её решения в данной работе используется разностная схема второго порядка точности, построенная на разнесенной расчетной сетке рис.1. [2].

Основной проблемой стандартных (неизвестные  $u, v, h$  определены в одном расчетном узле) разностных схем второго и выше порядка точности (в т.ч. схема Лакса-Вендроффа) является то, что они не сохраняют монотонность. В связи с этим, могут требоваться методы подавления сильных осцилляций в решении, появляющихся вблизи гидродинамических разрывов, которые могут приводить к неконсервативности разностной схемы [3]. Например, при решении задачи об обрушении водного столба методом Лакса-Вендроффа в [3], возникают осцилляции, для устранения которых применяется метод искусственной вязкости.

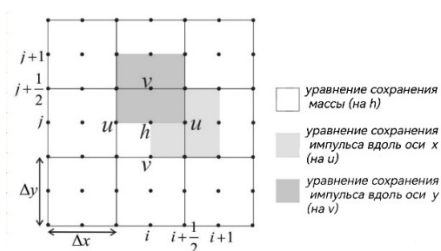


Рис.1. Схема расчетных узлов разнесенной сетки момент

для решения УМВ, с указанием типов расчетных ячеек [2].

Использование разностной схемы на разнесенной сетке рис.1, не смотря на второй порядок аппроксимации, не приводит к появлению высокочастотных осцилляций рис.2, что значительно упрощает вычисления. Если сравнивать схему расчетных узлов для метода Лакса-Вендроффа со схемой расчетных узлов для метода разнесенных сеток рис.1, можно заметить, что для аппроксимации первых производных в методе Лакса-Вендроффа используется разница значений в вершинах через одну, а во втором методе – в соседних узлах. Первый метод в этом смысле оказывается более подвержен осцилляциям, чем второй, так как значения неизвестных в узлах сетки схемы Лакса-Вендроффа “слабее” связаны друг с другом по сравнению со второй схемой.

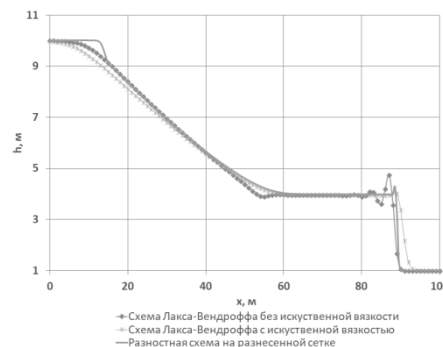


Рис.2. Высота профиля водной поверхности в

времени  $t = 10$ с; сравнение разностных методов.

### Список литературы

1. С.И. Сумской, А.А. Агапов, А.С. Софьин и др. // Безопасность труда в промышленности. 2014. № 9. С. 50.
2. Novry E., Didit A., Noryaman T. and others // Fluids, 2020. P. 149. <https://doi.org/10.3390/fluids5030149>
3. Кирсанова А.М. Сумской С.И. // Лаплаз – 2023. 9-я Межд. конф. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 363

С.П. БАУТИН, И. А. ВАЗИЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Снежинск, Россия*

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ**

S. P. BAUTIN, I. A. VAZIEVA

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Russia*

## **REPRESENTATION OF SOLUTIONS TO THE NONLINEAR HEAT CONDUCTIVITY EQUATION BY TRIGONOMETRIC SERIES**

Предложенная в работе [1] методика решений нелинейных уравнений с частными производными применена к нелинейному уравнению теплопроводности в одномерном плоскосимметричном случае

$$u_t = uu_{xx} + \frac{1}{\sigma} u_x^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  есть положительная константа. То есть решение уравнения (1) представляется в виде тригонометрического ряда по косинусам

$$u(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) \cos(kx). \quad (2)$$

Для уравнения на отрезке  $[0, \pi]$  ставятся непрерывные начальные условия, которые чётным образом продолжаются на отрезок  $[-\pi, 0]$  и поэтому можно воспользоваться рядом (2). Заметим, что решение уравнения (1) в виде тригонометрических рядов по синусам невозможно в силу конкретного вида нелинейности исходного уравнения. Для коэффициентов ряда (2) получена бесконечная система обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме. С помощью тождественных преобразований от бесконечных двойных сумм сделан переход к одинарным бесконечным суммам.

Доказана локальная сходимость ряда (2) по времени. Для последующего построения приближенных решений используются конечные отрезки тригонометрических рядов. В метрике  $L_2$  оценено отличие конечных сумм при разном числе слагаемых.

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргера тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 305-318.

В.В. ВЕДЕНЯПИН, Н.Н. ФИМИН, В.М. ЧЕЧЁТКИН, А.А.РУССКОВ  
*ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

## ОБ УРАВНЕНИЯХ ТИПА ВЛАСОВА, КОСМОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЯХ И РАСШИРЕНИИ ВСЕЛЕННОЙ

Рассмотрены вывод и свойства уравнений Власова-Эйнштейна и Власова-Пуассона и космологические решения.

V.V. VEDENYAPIN, N.N. FIMIN, V.M. CHECHETKIN, A.A. RUSSKOV  
*Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## ON VLASOV-TYPE EQUATIONS, COSMOLOGICAL SOLUTIONS AND EXPANDING OF UNIVERSE

We consider derivation and properties of Vlasov-Einstein and Vlasov-Poisson equations and cosmological solutions.

В классических работах (см. [1–4]), уравнения для полей предлагаются без вывода правых частей. Здесь мы даем вывод правых частей уравнений Максвелла и Эйнштейна в рамках уравнений Власова–Максвелла–Эйнштейна из классического, но немного более общего принципа наименьшего действия [5–11]. Получающийся вывод уравнений типа Власова даёт уравнения Власова–Эйнштейна отличные от того, что предлагались ранее [12–15]. Предлагается способ перехода от кинетических уравнений к гидродинамическим следствиям [5–8], как это делалось раньше уже самим А.А. Власовым [4]. В случае гамильтоновой механики от гидродинамических следствий уравнения Лиувилля возможен переход к уравнению Гамильтона–Якоби, как это делалось уже в квантовой механике Е. Маделунгом [16], а в более общем виде В.В.Козловым [17–18]. Таким образом получаются в нерелятивистском случае решения Милна–Маккри, а также нерелятивистский и релятивистский анализ решений типа Фридмана нестационарной эволюции Вселенной. Это позволяет проанализировать Лямбду Эйнштейна и темную энергию как причину ускоренного расширения Вселенной.

### *Список литературы*

1. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: ЛКИ, 2007.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
3. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975, 696 стр.
4. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966. 356 стр.
5. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тожество Лагранжа и форма Годунова // Теоретическая и математическая физика. ---2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.
6. Веденяпин В.В., Негматов М.-Б. А., Фимин Н.Н. Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия. Изв. РАН. Сер. матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.
7. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тожество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса. СМФН, 2013, том 47, С. 5–17.
8. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. М.: Физматлит, 2001.
9. Веденяпин В.В. Уравнение Власова-Максвелла-Эйнштейна // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 188. 20 с.
10. Vedenyapin V.V., Fimin N.N., Chechetkin V.M. The system of Vlasov–Maxwell–Einstein-type equations and its nonrelativistic and weak relativistic limits // International Journal of Modern Physics D, 2020. V. 29. № 1. 23 p.
11. Vedenyapin, V., Fimin, N., Chechetkin, V. The properties of Vlasov–Maxwell–Einstein equations and its applications to cosmological models // European Physical Journal Plus. 2020. № 400. 14 с.
12. Cercignani C., Kremer G.M. The relativistic Boltzmann Equation: theory and applications. Boston, Basel, Berlin: Birghause, 2002.
13. Choquet–Bruhat Y., . Introduction to general relativity, black holes and cosmology. New York: Oxford University Press. 2015.
14. Rein G., Rendall A.D. Global existence of solutions of the spherically symmetric Vlasov-Einstein system with small initial data, Commun. Math. Phys. 150, 561-583, (1992).
15. Kandrup H.E., Morrison P.J. Hamiltonian structure of the Vlasov–Einstein system and the problem of stability for spherical relativistic star clusters // Ann. Phys. 1993. V. 225. P. 114–166.
16. Madelung E. Quantentheorie in hydrodynamischer form (Quantum theory in hydrodynamic form), Z Phys, 40 (1926), 322–326.
17. Козлов В. В. Гидродинамика гамильтоновых систем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1 Матем. Мех., 1983, № 6, 10–22;
18. Козлов В. В., Общая теория вихрей, Изд-во Удмуртского ун-та, Ижевск, 1998, 239с.

В.С.ДРЮМА

Vladimir Andrunachievici Institute of Mathematics and Computer Science, Moldova State University, Chisinau, R.Moldova

## О ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОДУ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ЦИКЛАМИ

Изучаются свойства полиномиальных систем ОДУ первого порядка с решения в виде предельных циклов.

V.S. DRYUMA

Vladimir Andrunachievici Institute of Mathematics and Computer Science, Moldova State University, Chisinau, R.Moldova

## ON THE POLYNOMIAL SYSTEMS OF THE FIRST ORDER ODE's WITH A LIMIT CYCLES

A properties of the polynomial systems of first-order ODEs with limit cycles are studied.

Системы обыкновенных дифференциальных уравнений вида:  $\dot{x} = a_0 + a_1x + a_2y + a_{11}x^2 + a_{12}xy + a_{22}y^2$ ,  $\dot{y} = b_0 + b_1x + b_2y + b_{11}x^2 + b_{12}xy + b_{22}y^2$ , где  $a_i, a_{ij}, b_i, b_{ij}$ - набор параметров, имеют важные приложения в теоретической и математической физике. Они описывают свойства пространства состояний различного рода физических систем и структур. Несмотря на их обманчивую простоту с ними связана важная нерешенная проблема классификации квадратичных и кубических систем, обладающими предельными циклами в качестве решений. В докладе на частном примере двух квадратичных систем первого вида

$$\dot{x} = y + y^2, \quad \dot{y} = -x + \mu y - xy + (1 + \mu)y^2, \quad \dot{z} = y + y^2, \quad \dot{y} = \mu y - xy + (\mu)y^2, \quad (1)$$

и которые являются частными системами общей 12-параметрической квадратичной системы ОДУ с параметрами  $a$  и  $b$ , обсуждается подход к проблеме связанной со свойствами их предельных циклов.

В проективных координатах  $\xi = x/z, \eta = y/z$  обе системы из (1) являются частными случаями системы трех уравнений с однородными правыми частями  $\dot{z} = 4a_0z^2 + (4a_2y + (3a_1 - b_2)x)z + 4a_{22}y^2 + (3a_{12} - 2b_{22})xy + (2a_{11} - b_{12})x^2$ ,  $\dot{y} = 4b_0z^2 + (3b_2 - a_1)y + 4b_{1x}z + (2b_{22} - a_{12})y^2 + (-2a_{11} + 3b_{12})xy + 4b_{11}x^2$

важное свойство которой состоит в том, что она эквивалентна квадратичному ОДУ первого порядка  $((b_{22} + a_{22})t^2 + (a_0 + a_2t)A(t) + b_2t + b_0)$  (2)

и которое в переменных  $S = z^2$  является эллиптической кривой рода  $g=1$  с  $J$ -инвариантом, зависящим от параметров  $(a, b)$ , определяющего топологические свойства соответствующей алгебраической кривой. Так, первой системе уравнений из (1) соответствует уравнение (2) вида  $(-2T^2t - 2T - T^2 - T - t - 1)S + T^3 + (1 + T)^2 + T = 0$  с инвариантом  $J = \dots$  где  $M = (t + \mu^4 + t\mu^3 - 8)$ , Второй системы из (1) соответствует уравнение (2) вида  $(-2T^2t - 2T - T^2 - T - t - 0.5)S + T^3 + (0.8 + T)^2 + T = 0$  с инвариантом  $J = \dots$ , где  $K = -80$  (5 + 60t + 20)^3, L = t^2 (1 000t^4 - 4000 - 7000).

С помощью полученных выражений для  $J$ -инвариантов исследуются свойства соответствующих абелевых мно-гообразий и определяются значения параметра  $\mu$  при котором существуют предельные циклы систем из (1).

Список литературы

1. Dryuma V. On limit cycles of polynomial systems of the first-order ODE's, Buletinul AS Rep. Moldova, Matematica, v2(90), 2019, 113-126.

В.И. ЕРОФЕЕВ<sup>1</sup>, А.В. ЛЕОНТЬЕВА<sup>1</sup>, А.В. ШЕКОЯН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем машиностроения РАН Российской академии наук», Нижний Новгород, Россия;

<sup>2</sup>Институт механики Национальной академии наук Армении, Ереван, Армения

## ПРОСТРАНСТВЕННО ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ В МАТЕРИАЛАХ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ

В работе рассматривается распространение нелинейных продольных волн в среде с точечными дефектами. Самосогласованная математическая модель, включающая в себя уравнения теории упругости и кинетические уравнения для плотностей различных типов точечных дефектов, в условиях статической деформации сведена к нелинейному эволюционному уравнению, объединяющему в себе известные уравнения волновой динамики: Кортевега–де Вриза–Бюргерса и Клейна–Гордона. Найдены и проанализированы точные аналитические решения полученного эволюционного уравнения.

V.I. EROFEEV<sup>1</sup>, A.V. LEONTEVA<sup>1</sup>, A.V. SHEKOYAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia;

<sup>2</sup>Institute of Mechanics of the National Academy of Sciences of the Republic of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

## SPATIALLY LOCALIZED NONLINEAR WAVES IN MATERIALS WITH POINT DEFECTS

The paper examines the propagation of nonlinear longitudinal waves in a medium with point defects. A self-consistent mathematical model, including equations of the theory of elasticity and kinetic equations for the densities of various types of point defects, under conditions of static deformation, is reduced to a nonlinear evolutionary equation that combines the well-known equations of wave dynamics: Korteweg–de Vries–Burgers and Klein–Gordon. Exact analytical solutions of the resulting evolution equation are found and analyzed.

Самосогласованная задача, включающая в себя динамическое уравнение теории упругости и кинетическое уравнение для плотности дефектов, предложена в [1]. Если имеется только статическая деформация, то система уравнений, учитывающая объемную взаимную рекомбинации разноименных дефектов, сводится к одному уравнению, описывающему динамику точечных дефектов. Если в системе рекомбинация дефектов и диффузионные процессы проявляются одинаково сильно, то в эволюционном уравнении нельзя пренебрегать слагаемыми, необходимо рассматривать его целиком. При преобладании диффузии над рекомбинацией дефектов, эволюционное уравнение преобразуется в уравнение Кортевега–де Вриза–Бюргерса. Если процессы рекомбинации дефектов доминируют над диффузионными процессами, эволюционное уравнение сводится к уравнению Клейна–Гордона, содержащему квадратичную нелинейность.

Эволюционное уравнение в переменных бегущей волны принимает вид обыкновенного дифференциального уравнения. Решение этого уравнения можно найти, используя метод простейших уравнений [2, 3]. Метод предложен Н.А. Кудряшовым, применяется для поиска точных решений нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений и позволяет строить решения исходного уравнения на основе известных решений простейших уравнений. В качестве простейших уравнений могут выступать уравнения Риккати, Якоби и Вейерштрасса. Здесь в качестве простейшего уравнения служит уравнение Риккати с постоянными коэффициентами. В предельном случае, связанном с уравнением Кортевега–де Вриза–Бюргерса, показано, что имеют место стационарные волны с убывающим или возрастающим профилем функции объемной концентрации точечных дефектов. В предельном случае, связанном с уравнением Клейна–Гордона, при отрицательном значении коэффициента при линейном слагаемом с нулевой производной возможно распространение стационарных волн сжатия при любом знаке коэффициента при нелинейном слагаемом; при положительном значении коэффициента при линейном слагаемом с нулевой производной возможно распространение волны разрежения [4].

В средах с одним типом точечных дефектов возможно распространение нелинейных стационарных волн деформации. Их скорость фиксирована и ее значения отличаются для сред с вакансиями и сред с межузлиями, т.е. скорости принадлежат различным интервалам. Тип дефектов в материале влияет на тип стационарной волны, так в средах с вакансиями формируется волна сжатия, а в средах с межузлиями – волна разрежения. В среде с вакансиями нелинейная волна обладает большей скоростью, но меньшими амплитудой и шириной по сравнению с волной, распространяющейся в среде с межузлиями.

### Список литературы

1. Мирзоев Ф.Х., Шелепин Л.А. Нелинейные волны деформации и плотности дефектов в металлических пластинах при воздействии внешних потоков энергии // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 8. – С. 23–26.
2. Кудряшов Н.А. Аналитическая теория нелинейных дифференциальных уравнений. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 360 с.
3. Кудряшов Н.А. Методы нелинейной математической физики: Учебное пособие. – Долгопрудный: Изд. Дом Интеллект, 2010. – 368 с.
4. Ерофеев В.И., Леонтьева А.В., Мальханов А.О. Влияние дефектов на пространственную локализацию нелинейных акустических волн // Известия РАН. Серия физическая. – 2018. – Т. 82, № 5. – С. 591–596.

## ФИЗИЧЕСКАЯ НЕРЕАЛИЗУЕМОСТЬ ТОЧНЫХ УЕДИНЕННО – ВОЛНОВЫХ РЕШЕНИЙ В НЕКОТОРЫХ ЗАДАЧАХ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ

Показано, что в некоторых задачах нелинейной волновой динамики деформируемых систем точные уединенно – волновые решения физически недостоверны вследствие того, что условия их формального существования противоречат гипотезам и предпосылкам, лежащим в основе исходных математических моделей.

A.I. ZEMLYANUKHIN, N.A. ARTAMONOV, V.A. BOCHKAREV

*Yuri Gagarin state technical university of Saratov, Saratov, Russia*

## PHYSICAL IMPOSSIBILITY OF EXACT SOLITARY WAVE SOLUTIONS IN SOME PROBLEMS OF NONLINEAR WAVE DYNAMICS

It is shown that in some problems of nonlinear wave dynamics of deformable systems, exact solitary wave solutions are physically unreliable due to the fact that the conditions of their formal existence contradict the hypotheses and premises underlying the original mathematical models.

Стремление к большей адекватности при моделировании нелинейных волновых процессов в деформируемых системах приводит к тому, что объектом исследования становится неинтегрируемое квазигиперболическое или эволюционное уравнение (система уравнений). Развитие методов построения классов точных решений таких уравнений, среди которых наибольший интерес представляют уединенно – волновые решения, в последние десятилетия стало одним из основных направлений неклассической математической физики [1]. Однако, существование точного решения не гарантирует его физической реализуемости. Это связано с тем, что точные решения неинтегрируемых уравнений уникальны в том смысле, что существуют лишь при определенных значениях коэффициентов уравнений и дополнительных соотношениях, связывающих коэффициенты с параметрами решений. В ряде случаев необходимые условия существования решений противоречат основным допущениям и гипотезам, лежащим в основе исходной математической модели. Таким образом, формально существующее точное решение оказывается бесполезным для практических приложений.

В качестве примера рассмотрим типичное квазигиперболическое уравнение, возникающее при моделировании нелинейных продольных волн в стержнях, пластинах и оболочках [2], взаимодействующих с нелинейно – упругой средой:  $U_{\xi\xi} + aU_{\xi\xi\xi} = \beta U - \gamma U^k$  (1), где  $U$  – компонента продольного смещения,  $a$  – коэффициент высокочастотной дисперсии,  $\beta, \gamma$  – параметры нелинейно – упругой среды,  $k = 2$  или  $k = 3$  (чаще всего). Отметим, что правая часть уравнения (1) представляет собой нелинейный феноменологический закон деформирования внешней среды. В переменной бегущей волны (1) совпадает с редукцией обобщенного уравнения Брезертона [3]. При  $k = 2$  точное уединенно – волновое решение уравнения (1) с полюсом 4 порядка и имеет вид  $U = A_1(\operatorname{sech}\delta\xi)^4$ ,  $\xi = x - C_0t$ , а при  $k = 3$  точное решение с полюсом 2 порядка имеет вид  $U = A_2(\operatorname{sech}\delta\xi)^2$ .

Амплитуда физического состоятельного решения не может быть больше смещения, соответствующего точке максимума выбранного нелинейного закона деформирования внешней среды. Анализ полученных точных решений показывает, что их амплитуды более чем в два раза превосходят соответствующие допустимые значения смещений, что свидетельствует об их физической нереализуемости.

Физическая недопустимость некоторых точных локализованных решений не запрещает реального существования солитоноподобных волн в деформируемых системах с малой нелинейностью и большой дисперсией. Одним из возможных сценариев возникновения солитонов деформации в стержнях, пластинах и оболочках является развитие модуляционной неустойчивости периодических волн. Некоторые физически состоятельные точные периодические решения вместе с условиями развития их модуляционной неустойчивости получены в [2].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00071*

### *Список литературы*

1. Kudryashov N.A. Seven common errors in finding exact solutions of nonlinear differential equations. Commun. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat. – 2009. – Vol. 14. – P. 3507–3529.
2. Zemlyanukhin, A.I., Bochkarev, A.V., Erofeev, V.I., Ratushny, A.V. Axisymmetric longitudinal waves in a cylindrical shell interacting with a nonlinear elastic medium// *Wave Motion*, 2022, 114, 103020 <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2022.103020>
3. Kudryashov N.A., Sinelshchikov D.I., Demina M.V. Exact solutions of the generalized Bretherton equation. Physics Letters A. 2011.-Vol. 375.-P. 1074-1079.

А.В. АКСЕНОВ<sup>1</sup>, А.Д. ПОЛЯНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

## ТОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ТИПА МОНЖА – АМПЕРА

Исследуется параболическое уравнение Монжа – Ампера с тремя независимыми переменным, которое встречается в электронной магнитной гидродинамике. Построены точные решения с аддитивным, мультипликативным и обобщенным разделением переменных, многие из которых допускают представление в элементарных функциях. Описаны также некоторые инвариантные решения.

A.V. AKSENOV<sup>1</sup>, A.D. POLYANIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

## EXACT SOLUTIONS OF THE MAGNETIC HYDRODYNAMICS EQUATION MONGE-AMPERE TYPE

The parabolic Monge-Ampere equation with three independent variables, which occurs in electron magnetic hydrodynamics, is studied. Exact solutions with additive, multiplicative and generalized partitioning of variables are constructed, many of which admit representation in elementary functions. Some invariant solutions are also described.

Точные решения уравнений математической физики играют огромную роль в формировании правильного понимания качественных особенностей многих явлений и процессов в различных областях естествознания. Точные решения нелинейных уравнений наглядно демонстрируют и позволяют лучше понять механизмы таких сложных нелинейных эффектов, как пространственная локализация процессов переноса, множественность или отсутствие стационарных состояний при определенных условиях, существование режимов с обострением и др.

Исследуется параболическое уравнение Монжа – Ампера с тремя независимыми переменным, которое встречается в электронной магнитной гидродинамике [1].

В данной работе для поиска точных решений нелинейного уравнения магнитной гидродинамики использованы различные модификации метода обобщенного разделения переменных и приведенные в [2] точные решения более простых, чем исходное, промежуточных редуцированных уравнений с меньшим числом независимых переменных. Особое внимание уделяется построению простых точных решений, которые выражаются через элементарные функции [3,4]. Такие решения удобно использовать в качестве тестовых задач для оценки точности и проверки адекватности численных методов решения сильно нелинейных уравнений с частными производными. Описаны также некоторые инвариантные решения, зависящие от одного или двух свободных параметров.

### Список литературы

1. Zaburdaev V.Yu., Smirnov V.V., Chukbar K.V. Nonlinear dynamics of electron vortex lattices // Plasma Physics Reports. 2014. V. 30. № 3. Pp. 214–217.
2. Polyanin A.D., Zaitsev V.F. Handbook of Nonlinear Partial Differential Equations, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.
3. Aksenov A.V., Polyanin A.D. Methods for constructing complex solutions of nonlinear PDEs using simpler solutions // Mathematics. 2021. V. 9. № 4. 345.
4. Аксенов А.В., Полянин А.Д. Обзор методов построения точных решений уравнений математической физики, основанных на использовании более простых решений // Теоретическая и математическая физика. 2022. Т. 211. № 2. С. 567–594.

М.В. АРТЕМЬЕВА, М.О. КОРПУСОВ

*Московский государственный университет, физический факультет, Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РАЗРУШЕНИЕ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ТЕПЛО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ (1+1)-МЕРНОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ПОЛУПРОВОДНИКА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ**

Рассматривается одна тепло-электрическая (1+1)-мерная модель нагрева полупроводника в электрическом поле. Для соответствующей начально-краевой задачи доказано существование непродолжаемого во времени классического решения и получены достаточные условия разрушения решения за конечное время.

M.V. ARTEMEVA, M.O. KORPUSOV

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **THE BLOW UP OF THE SOLUTION TO A HEAT-ELECTRIC (1+1)-DIMENSIONAL MODEL OF SEMICONDUCTOR HEATING IN AN ELECTRIC FIELD**

A heat-electric (1+1)-dimensional model of semiconductor heating under an electric field is considered. For the corresponding initial-boundary value problem, the existence of a classical solution which is short-lived in time is proven and sufficient conditions for the blow up of the solution in finite time are obtained.

Современные радиоинформационные системы (РИС), решающие задачи мониторинга космического пространства, характеризуются большим числом плотно расположенной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), непрерывным функционированием в течение длительного времени, а также высокими требованиями к надежности. При работе структурно-сложной РИС в теплонапряженных режимах резко возрастает тепловыделение в РЭА за счет высокой токовой нагрузки. Повышение тепловыделения влечет за собой перегрев аппаратуры и, как следствие, снижение надежности изделия [1], а также увеличение вероятности отказов аппаратуры. Данные обстоятельства обуславливают необходимость исследования нелинейных тепловых процессов в полупроводнике, а также построения и изучения тепло-электрической модели полупроводника.

В настоящей работе мы рассматриваем следующую задачу [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \phi_{xx} + \frac{\gamma}{2} |\phi_x|^2 \right) + \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon} \phi_{xx} = 0.$$

На отрезке  $x \in [0, L]$  с граничными условиями

$$\phi(0, t) = \mu_0(t), \quad \phi_x(0, t) = \mu_1(t), \quad \phi(x, 0) = \phi_0(x),$$

мы получили результат о существовании непродолжаемого во времени классического решения, а также получили достаточные условия разрушения решений за конечное время, что с физической точки зрения означает возникновение электрического “пробоя”.

### *Список литературы*

1. А. В. Тимошенко, Д. В. Калеев, А. Ю. Перлов и др., “Сравнительный анализ аналитических и эмпирических методик оценки текущих параметров надежности радиолокационных комплексов мониторинга”, Известия высших учебных заведений. Электроника., 25:3, 2020, 244–254.
2. М. О. Корпусов, А. Ю. Перлов, А. В. Тимошенко, Р. С. Шафир, “О разрушении решения одной нелинейной системы уравнений тепло-электрической модели”, Математические заметки, 114:5, 2023, 759–772.



## ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЕМОЙ ОБОБЩЕННЫМ НЕЛИНЕЙНЫМ УРАВНЕНИЕМ ШРЁДИНГЕРА С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ СЕДЬМОЙ СТЕПЕНИ

Рассмотрены солитонные решения модели, описываемой обобщенным нелинейным уравнением Шрёдингера второго порядка с нелинейностями третьей, пятой и седьмой степеней. Проведено численное моделирование солитонных решений модели с использованием Фурье-метода расщепления по физическим факторам (split-step Fourier method). Проведена серия численных экспериментов для оценки устойчивости солитонных решений модели.

A.A. BAYRAMUKOV, N.A. KUDRYASHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL SOLUTIONS OF THE MODEL DESCRIBED BY THE GENERALIZED NONLINEAR SHRÖDINGER EQUATION WITH NONLINEARITY OF THE SEVENTH POWER

Solitary wave solutions of the model described by the generalized nonlinear Schrödinger equation of the second order with nonlinearities of the third, fifth and seventh degrees are considered. Numerical modeling of soliton solutions of the model was carried out using the split-step Fourier method. A series of numerical experiments were carried out to assess the stability of soliton solutions of the model.

Нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) представляет собой базовую модель для описания распространения импульсов в нелинейных оптических средах. Нелинейное слагаемое НУШ связано с оптической восприимчивостью среды третьего порядка [1]. Для повышения точности модели может быть учтена оптическая восприимчивость среды более высоких порядков. Так, можно получить обобщенные НУШ с дополнительными нелинейными слагаемыми, имеющими пятую, седьмую, и другие, более высокие степени. Обобщения НУШ такого рода являются объектом исследования множества работ. Особый интерес представляют точные решения обобщенных моделей в виде уединенных волн — солитонов.

В работе рассмотрена модель, описываемая обобщенным НУШ второго порядка с нелинейностями третьей, пятой и седьмой степеней:

$$\begin{aligned} i\partial_t q + c_1 \partial_x^2 q &= (c_2 |q|^2 + c_3 |q|^4 + c_4 |q|^6)q, \\ q(x, 0) &= q_0, \quad -\infty < x < \infty, \quad t > 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\partial_t, \partial_x$  — операторы дифференцирования по  $t$  и  $x$  соответственно,  $q(x, t)$  — комплекснозначная функция,  $c_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) — действительные коэффициенты,  $i$  — мнимая единица.

Известно, что модель (1) имеет точные решения в виде уединенных волн [2]:

$$q(x, t) = \sqrt{M_0 - \frac{M_1}{4 \cosh^2(m(\zeta(x - 2kt - x_0) - \zeta_0))}} \exp i(kx - \omega t - \theta), \quad (2)$$

где  $\zeta(z)$  — неявная функция, заданная выражением

$$z = z_0 + \frac{2M_1}{mM_0 \sqrt{4M_0M_1 + M_1^2}} \operatorname{arctanh} \left( \frac{2M_0(e^{m\zeta} + 1) + M_1}{\sqrt{4M_0M_1 + M_1^2}} \right) + \frac{\zeta}{M_0}.$$

Здесь постоянные  $m, M_0, M_1$  выражаются через коэффициенты модели,  $k$  и  $\omega$  связаны дисперсионным соотношением.

Для численного моделирования использовался Фурье-метод расщепления по физическим факторам (split-step Fourier method) [3]. Результаты численного моделирования точных решений в виде уединенных волн демонстрируют соответствие аналитическим результатам. Проведенный численный эксперимент по взаимодействию точных решений в виде уединенных волн с возмущением в форме солитона показал, что при определенных параметрах модели (1) солитонные решения достаточно устойчивы и не деформируются при прохождении друг через друга. Этот результат может быть важен в связи с возможностью использования солитонов для передачи информации в оптических средах, описываемых обобщенным НУШ второго порядка с нелинейностями третьей, пятой и седьмой степеней.

### Список литературы

1. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – Academic Pr, 1989.
2. Kudryashov N.A. Method for finding optical solitons of generalized nonlinear Schrödinger equations // Optika. 2022. Vol. 261. P. 169163.
3. J. Weideman and B. Herbst. "Split-step methods for the solution of the nonlinear Schrödinger equation". In: SIAM Journal on Numerical Analysis 23.3 (1986).

С.П. БАУТИН, А. Г. ОБУХОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Снежинск, Россия  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

## ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЙ ВЯЗКОГО ТЕПЛОПРОВОДНОГО ГАЗА ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИМИ РЯДАМИ

S. P. BAUTIN, A. G. OBUKHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Snezhinsk, Russia  
Tyumen Industrial University, Russia

## REPRESENTATION OF VISCOUS HEAT-CONDUCTING GAS FLOWS BY TRIGONOMETRIC SERIES

В качестве математическом модели для приближенной передачи двумерных нестационарных движений сжимаемого вязкого теплопроводного газа рассматривается полная система уравнений Навье-Стокса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_t + u\delta_x + v\delta_y - \delta(u_x + v_y) = 0, \\ u_t + uu_x + vv_y + \frac{1}{\gamma}\delta p_x = \mu_0\delta \left( \frac{1}{4}v_{xy} + u_{xx} + \frac{3}{4}u_{yy} \right), \\ v_t + uv_x + vv_y + \frac{1}{\gamma}\delta p_y = \mu_0\delta \left( \frac{1}{4}u_{xy} + v_{yy} + \frac{3}{4}v_{xx} \right), \\ p_t + up_x + vp_y + \gamma p(u_x + v_y) = \varkappa_0 p(\delta_{xx} + \delta_{yy}) + \\ \quad + 2\varkappa_0(p_x\delta_x + p_y\delta_y) + \varkappa_0\delta(p_{xx} + p_{yy}) + \\ \quad + \mu_0\gamma(\gamma - 1) \left[ (u_x^2 - u_x v_y + v_y^2) + \frac{3}{4}(u_y + v_x)^2 \right], \end{array} \right.$$

$\delta = 1/\rho$  – удельный объем

В монографии [1] было предложено представлять одномерные решения полной системы уравнений Навье-Стокса в виде тригонометрических рядов. В данной работе рассматривается случай двух пространственных переменных и используются следующие представления искомых функций:

$$\delta(t, x, y) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \delta_{k,1}(t) \cos(kx) + \delta_{k,2}(t) \cos(ky) \right];$$

$$u(t, x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ u_{k,1}(t) \sin(kx) + u_{k,2}(t) \sin(ky) \right];$$

$$v(t, x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ v_{k,1}(t) \sin(kx) + v_{k,2}(t) \sin(ky) \right];$$

$$p(t, x, y) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ p_{k,1}(t) \cos(kx) + p_{k,2}(t) \cos(ky) \right].$$

При различных начальных данных в работе рассмотрены конкретные нестационарные двумерные периодические по пространственным переменным  $x, y$  течения газа и проанализированы их свойства.

1. Баутин С.П., Замыслов В.Е. Представление решений уравнения Бюргерса тригонометрическими рядами // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», 2022, том 11, № 4, с. 305-318.

К.В. БРУШЛИНСКИЙ, М.Т. ИСТОМИНА, В.В. КРЮЧЕНКОВ, Е.В. СТЕПИН

*ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В НЕОДНОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКИ**

Предложена и реализована в расчётах плазмостатическая модель равновесия плазменных конфигураций в неодносвязной области магнитной ловушки “Галатеи-Пояса”, окружающих два токонесущих проводника квадратного сечения. Результаты расчётов сопоставлены с полученными ранее в упрощённой модели.

K.V. BRUSHLINSKII, M.T. ISTOMINA, V.V. KRIUCHENKOV, E.V. STEPIN

*M.V. Keldysh institute of applied mathematics, RAS, Moscow, Russia*

*National research nuclear university MEPH, Moscow, Russia*

## **MATHEMATICAL MODEL OF PLASMA EQUILIBRIUM IN THE MULTIPLY CONNECTED DOMAIN OF A MAGNETIC TRAP**

We present a plasmastatic model of equilibrium plasma configurations in the multiply connected domain of the magnetic trap “Galatea-Belt” enclosing two square cross-section current carrying conductors. The computation results are compared with the preceding ones, received earlier by means of a simplified model.

В докладе уточняются численная модель и результаты расчётов равновесных плазменных конфигураций в магнитной ловушке “Пояс” [1] из класса предложенных А.И. Морозовым ловушек-галатей [2]. Удерживающее магнитное поле создано токонесущими проводниками, погружёнными в плазму, но не соприкасающимися с ней.

В серии предшествующих работ (см., например, [3, 4] и содержащуюся в них библиографию) были исследованы геометрия и основные закономерности конфигураций в распрямлённой в цилиндр тороидальной ловушки “Пояс” с двумя проводниками, параллельными его оси. Двумерная плазмостатическая модель конфигурации основана на численном решении краевой задачи с известным полулинейным эллиптическим уравнением Грэда-Шафранова для функции магнитного потока в сечении цилиндра. Она содержала существенное упрощающее предположение, позволяющее иметь дело с односвязной областью решения задачи: сечения проводников не исключались из области, а токи в них представлены дополнительными слагаемыми в уравнении.

В предлагаемой работе это упрощение отсутствует, и задача ставится в неодносвязной области вне проводников квадратного сечения. Роль электрического тока в образовании и поддержании равновесной магнитоплазменной конфигурации играет граничное условие, содержащее циркуляцию магнитного поля вдоль границы каждого проводника, т.е. интеграл от нормальной производной искомой функции. В серии расчётов с различными значениями безразмерных параметров задачи в неодносвязной области установлено, что основные свойства конфигурации и закономерности их зависимости от параметров качественно совпадают с полученными ранее в односвязной области. Это говорит о легитимности предыдущего варианта модели и в то же время уточняет его результат.

В обсуждаемой модели допустимое значение отношения характерных величин газового и магнитного давлений определяется требованием существования фиксированного расстояния между условной границей плазменной конфигурации и поверхностями проводников. В расчётах уточнена зависимость геометрии и количественных характеристик конфигураций от безразмерных параметров задачи.

Неодносвязные области с проводниками квадратного сечения участвовали ранее в плазмодинамической модели формирования равновесных конфигураций [5].

### *Список литературы*

1. Морозов А.И., Франк А.Г. Физика плазмы, 1994, Т. 20, № 11, С. 982-989
2. Морозов А.И. Физика плазмы, 1992, Т. 18, вып. 3, С. 305-316
3. Брушлинский К.В., Кондратьев И.А. Матем. Моделирование, 2018, Т. 30, № 6, С. 76-94
4. Brushlinskii K.V., Stepin E.V. Journ. of Phys.: Conf. Ser. 2028 (2021), 012026
5. Дудникова Г.И., Федорук М.П., Яковлев В.С. Вычислительные технологии, 2000, Т. 5, № 2, С 26-34

A BISWAS

*Department of Mathematics and Physics, Grambling State University, Grambling, LA—71245, USA*

### **QUASI—STATIONARY OPTICAL GAUSSONS WITH MAXIMUM INTENSITY**

This presentation is on the dynamics of optical solitons with log—law nonlinearity, also known as optical *Gaussons*, in the presence of perturbation terms. The governing model is the nonlinear Schrodinger's equation that carries logarithmic form of nonlinear refractive index. A few perturbation terms, with maximum intensity, are included to get a better understanding of the *Gausson* transmission dynamics. These include multi—photon absorption, Raman scattering, self—steepening effects, self—frequency shift, nonlinear dissipation, saturable amplifiers, and others. The multiple—scale perturbation analysis, together with the Wentzel—Kramers—Brillouin—Jeffrey's (WKBJ) hypothesis are implemented to retrieve the quasi—stationary optical *Gaussons* solution. The WKBJ definition of the phase that is introduced reveals a couple of resonant conditions which cannot be otherwise recovered.

## SPATIAL-TEMPORAL SIR MODELS WITH VITAL DYNAMICS

The Susceptible-Infected-Recovered (SIR) models are Ordinary Differential Equation (ODE) systems describing the transmission of the epidemics over time. The incorporation of spatial dimensions, along with considerations of birth and mortality rates, serves to transform these models into the one that captures the dynamic of disease in heterogeneous spatial domain, and presents the demographic dynamic.

The talk introduces an extension of a novel SIR Partial Differential Equation (PDE) model [1] into a two-dimensional spatial domain given by

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta DS\Delta I - \beta SI, \\ \frac{dI}{dt} = \beta DS\Delta I + \beta SI - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I, \end{cases}$$

where  $\beta$ ,  $D$  and  $\gamma$  denote the rate of contact, diffusion coefficient and recovery rate from infection, respectively. It explores the underlying factors contributing to the resilience of the protected zone against infection what is depicted for 1D in the following figure.

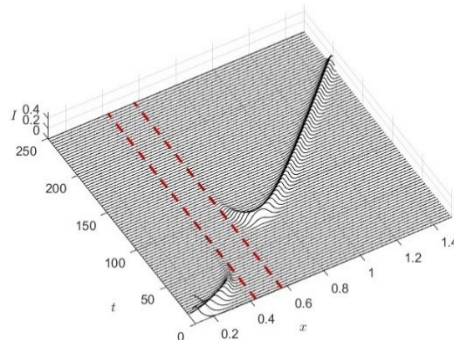


Fig. 1. A buffer zone.

Additionally, the talk incorporates the demographic dynamic in the extended model given by

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\beta DS\Delta I - \beta SI + r \left(1 - \frac{S}{K}\right) S - \mu S, \\ \frac{dI}{dt} = \beta DS\Delta I + \beta SI - mI, \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I - \mu R, \end{cases}$$

where  $r$ ,  $K$ ,  $\mu$  and  $m$  denote the intrinsic growth, carrying capacity, disease-free death rate and removal rate from the infection. The propagation of the infection in 1D spatial domain is illustrated by the following graph, where disease back to a specific location after a while due to the birth in the susceptible population.

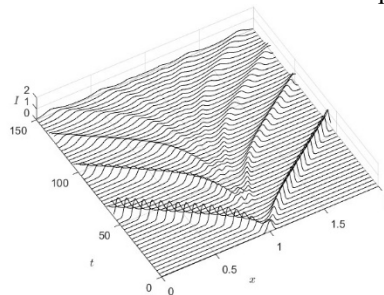


Fig. 2. Propagation of the infection

We observe that there is no protected zone from the infection, even as the peak of the disease declines over time. The talk discusses some assumptions for  $D$  and  $K$  that ensure the resilience of the disease in the spatial domain.

### References

1. Arvin Vaziry, T. Kolokolnikov, and P.G. Kevrekidis. Modelling of spatial infection spread through heterogeneous population: from lattice to partial differential equation models. Royal Society Open Science, 9(10), 2022.

## NONLINEAR LOVE WAVE MODELS IN HYPERELASTICITY AND VISCOELASTICITY FRAMEWORKS

We consider several models of shear waves propagating through linear/nonlinear media. One shear wave considered in seismology are Love waves. These are surface waves propagating through the interface between two media of differing wave speed [2]. Love waves are traditionally simulated with linear models, but these models only apply to materials undergoing an infinitesimal amount of strain. We use the hyper-viscoelasticity framework explained in [1] to generalize the classical models to potentially nonlinear materials undergoing a nontrivial amount of strain. The result is a nonlinear PDE whose qualitative behaviour we study numerically.

Of particular interest in this study are shear waves propagating through viscoelastic (potentially nonlinear) materials. We begin with a brief discussion of elasticity, viscosity, and the intuition behind how these phenomena are typically modelled. Much of this work generalizes the classical theory of Love waves to the case where the material undergoes noninfinitesimal strain. Love waves are surface waves propagating through the interface between two media of differing wave speed [2]. Assuming infinitesimal strain, the PDE modelling this situation is the 2D linear wave equation  $u_{tt} = c(z)^2(u_{xx} + u_{zz})$  where the wave speed  $c(z)^2$  has a jump discontinuity at the interface. The problem domain, the interface between the two media, and the boundary conditions are plotted below. Because of this discontinuity, the solutions are allowed a range of phase speeds. We compute a basis of solutions for this linear PDE (one mode is plotted below) and study some properties of this basis.

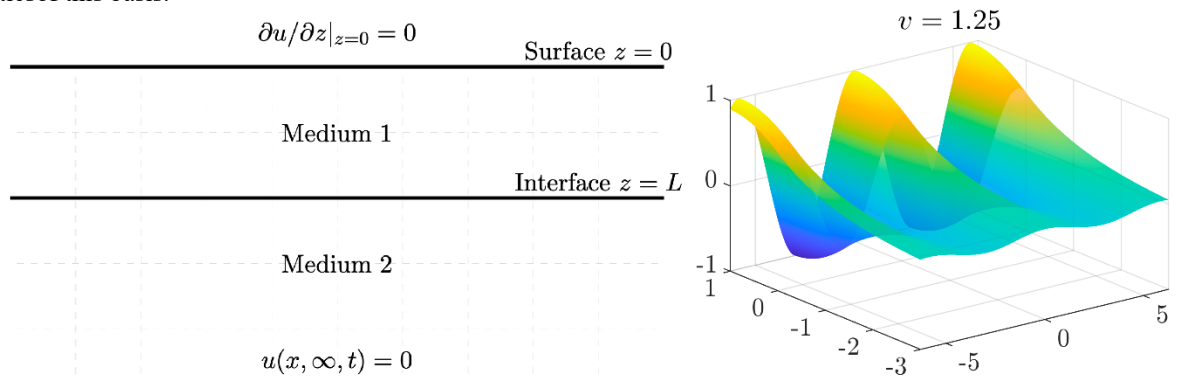


Fig. 1. Left: Problem domain and boundary conditions. Right: A fundamental solution to the linear PDE.

After discussing the foundational theory, we use the hyper-viscoelasticity framework explained in [1] to generalize the classical models to potentially nonlinear materials undergoing a nontrivial amount of strain. The result is a new nonlinear PDE whose qualitative behaviour we study numerically. In particular, we analyze a solution over the interface of two media of differing wave speeds to compare these Love waves to the traditional linear theory of Love waves. One such solution is plotted below.

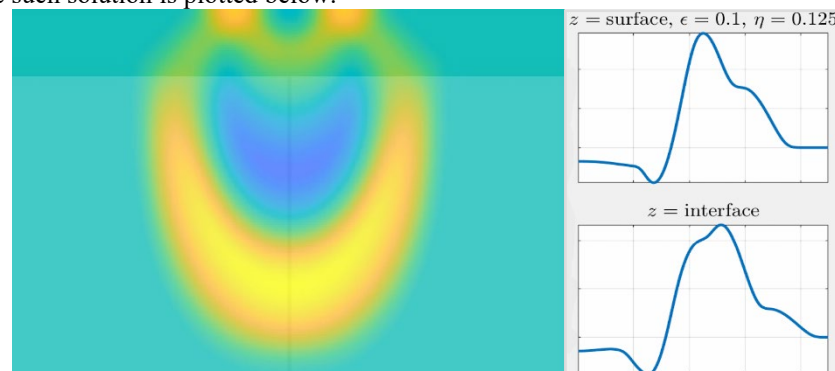


Fig. 2. Left: Numerical solution of viscoelastic Love waves over a rectangle. Right: Numerical solution along the top and interface of the domain.

### References

1. J. E. Marsden and T. J. R. Hughes, *Mathematical Foundations of Elasticity*. Dover, 1994.
2. A. Love, *Some Problems of Geodynamics: Being an Essay to Which the Adams Prize in the University of Cambridge was Ad-judged in 1911*. Dover books on geolog, Dover Publ., 1967.

## NEW EXACT AXIALLY AND HELICALLY SYMMETRIC SOLUTIONS TO PLASMA EQUILIBRIUM EQUATIONS

We derive new exact closed-form solutions of magnetohydrodynamics equations, with and without dynamics, which model astro-physical jets and other prolonged plasma configurations. The solutions are obtained in static and dynamic incompressible equilibrium settings, in axial and helical symmetry assumptions, and are given in terms of Whittaker, Coulomb, and Heun special functions. For each symmetry, two distinct families of physical solutions arise, corresponding to two distinct pressure profiles. One pressure profile models plasma supported by an external pressure and is suitable for the description of plasma configurations in a medium, such as atmosphere. The second profile features higher pressure inside the plasma domain and can model plasmas residing in a vacuum. Examples of static and dynamic solutions in axially and helically symmetric settings, including solutions with boundary current sheets, are presented and discussed.

An important problem in fluid dynamics and plasma physics is the derivation of exact solutions of the governing equations. Such solutions can have physical applications on their own right and/or be used as comparison ground for numerical solvers that in turn allow the treatment of much more complex geometrical configurations. In this work, we employ the reduction of the full system of magnetohydrodynamics (MHD) equations

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho \mathbf{V} &= 0, \\ \rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} &= \rho \mathbf{V} \times \operatorname{curl} \mathbf{V} - \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \times \operatorname{curl} \mathbf{B} - \operatorname{grad} P - \rho \operatorname{grad} \frac{|\mathbf{V}|^2}{2}, \\ \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= \operatorname{curl}(\mathbf{V} \times \mathbf{B}), \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{V} = 0, \end{aligned}$$

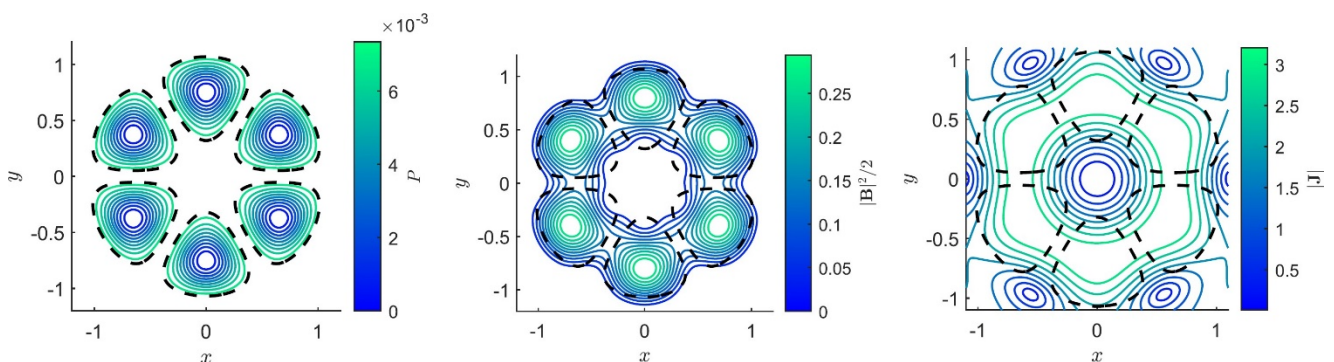
to a time-independent, stationary, and axially or helically symmetric setting, where the equations drastically simplify. In particular, in the helical setting, they reduce to a single Johnson–Frieman–Kulsrud–Oberman (JFKO) equation

$$\frac{\psi_{\xi\xi}}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{r^2 + \gamma^2} \psi_r \right) + \frac{I(\psi)I'(\psi)}{r^2 + \gamma^2} + \frac{2\gamma I(\psi)}{(r^2 + \gamma^2)^2} = -\mu P'(\psi),$$

and the magnetic field has the form

$$\mathbf{B} = \frac{\psi_\xi}{r} \mathbf{e}_r + \frac{rI(\psi) + \gamma\psi_r}{r^2 + \gamma^2} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\gamma I(\psi) - r\psi_r}{r^2 + \gamma^2} \mathbf{e}_z.$$

When the JFKO equation is linear, new solutions corresponding to physical plasma configurations, bounded by a current sheet or in the whole space, can be derived using special functions. We present such solutions and discuss their physical properties. Sample planar cross-sections of a helical solution, its pressure, magnetic energy, and current density is shown in a figure below.



1. Keller J., Cheviakov A. Phys Plasmas 2023. Vol. 30, 092308

З. АДЖИЕВ\*, И.В. МЕЛИХОВ\*, В.В. ВЕДЕНЯПИН\*\*, А.В. Гопин\*, Я.Г. Батищева

\*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*\*ФИЦ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

**НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К РАЗРАБОТКЕ ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫХ  
МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОГО  
ВЫСОКОДЕТАЛИЗИРОВАННОГО КИНЕТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ В  
ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Рассматриваются уравнения физико-химической кинетики, описывающие дисперсные гетерогенные среды, а также обобщения и дискретизации этих уравнений. Изучаются их консервативные и диссипативные свойства: законы сохранения, различные дискретизации, континуализации и H-теорема.

S.Z. ADZHIEV\*, I.V. MELIKHOV\*, V.V. VEDENYAPIN\*\*, A.V. GOPIN\*, YA.G.  
BATISHCHEVA

\*Lomonosov Moscow State University, Russia

\*\*Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**SOME APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF NATURAL SCIENCE  
MATHEMATICAL METHODS FOR A PHYSICALLY BASED HIGHLY DETAILED KINETIC  
DESCRIPTION OF PROCESSES IN DISPERSED SYSTEMS TO CONTROL THEM IN ORDER  
TO CREATE NEW GENERATION MATERIALS**

The equations of physicochemical kinetics, which describe dispersed heterogeneous media, as well as generalizations and discretizations of these equations, are considered. Their conservative and dissipative properties are studied: the conservation laws, various discretizations, continualizations, and the H-theorem.

Актуальным является создание физически обоснованных математических моделей различных процессов. Модель должна наследовать свойства исходного описания. Поэтому для уравнений типа физико-химической кинетики [1]–[9] необходимым условием этого является и требование свойства точной консервативности (т.е. чтобы в модели присутствовали те и только те законы сохранения, которые есть в исходном описании), и выполнение H-теоремы (Больцмана) [1], [3]. Мы показали, что H-теорема для явной дискретизации по времени систем уравнений физико-химической кинетики верна лишь в редких случаях [4], [5]. Но для неявной дискретизации по времени H-теорема верна при тех же условиях, что и в случае непрерывного времени [4], [6]. Для неявных многошаговых методов (в частности, для методов Гира) пока не удалось исследовать H-теорему, но эта задача является весьма актуальной в связи с необходимостью их использования для жёстких систем. Итак, выполнение H-теоремы зависит не только от уравнения, но и от способа его решения: от дискретизации [4], [5], [6], [7] или от перехода к континуальному описанию [7]. Также исследуются кинетические уравнения эволюции частиц, распределённых и по массе, и по массе и форме (высокодетализированное описание) [8]. Кроме того, для полноты картины рассмотрена новая форма H-теоремы, которая возникает в работах А. Пуанкаре, В.В. Козлова [10] и Д.В. Трещёва, для уравнения Лиувилля, для которого, как известно, при определённых условиях энтропия сохраняется, но энтропия временного среднего или среднего по Чезаро, т.е. предела среднего по времени при времени, стремящемся к бесконечности, может возрасть. Мы же исследовали пространство линейных по функции распределения законов сохранения для уравнения Лиувилля [3], [9]–[11] для круговой модели Марка Каца [9]–[11]. Именно линейные законы сохранения играют ключевую роль при рассмотрении H-теоремы.

*Список литературы*

1. Boltzmann L. // Wien: Akad. Sitzungsber, 1872. Bd. 66. S. 275–370. Перевод: Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука, 1984. Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа. С. 125–189.
2. Вольперт А.И. Худяев С.И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики // М.: Наука, 1975.
3. Веденяпин В.В., Аджиев С.З. Энтропия по Больцману и Пуанкаре // УМН 2014. Том 69. № 6 (420). С. 45–80.
4. Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Филиппов С.С. Об H-теореме для систем химической кинетики с непрерывным и дискретным временем и о системе уравнений нуклеосинтеза // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2018. Том 58, № 9. С. 1515–1528.
5. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. The H-theorem for the physico-chemical kinetic equations with explicit time discretization // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 481. P. 60–69.
6. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. The H-theorem for the physico-chemical kinetic equations with discrete time and for their generalizations // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2017. Vol. 480. P. 39–50.
7. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. On the H-theorem for the Becker–Döring system of equations for the cases of continuum approximation and discrete time // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2020. Vol. 553, № 124608. P. 1–13.
8. Adzhiev S.Z., Batishcheva Ya.G., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. Kinetic equations for particle clusters differing in shape and the H-theorem // Physics, MDPI. 2019. Vol. 1, № 2. P. 229–253.
9. Аджиев С.З., Веденяпин В.В. Временные средние и экстремали Больцмана для марковских цепей, дискретного уравнения Лиувилля и круговой модели Марка Каца // ЖВМ и МФ, 2011, Том 51, № 11, с. 2063–2074.
10. Козлов В.В. Тепловое равновесие по Гиббсу и Пуанкаре. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
11. Кац М. Несколько вероятностных задач физики и математики. М.: Наука, 1967.



## ГОРЕНИЕ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ИНИЦИИРОВАННОЕ ПОЛОТОМ ТЕЛА С ГИПЕРЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ

Проведено численное моделирование воспламенения, горения и перехода его в детонацию горючих газовых смесей в зависимости от величины гиперзвуковой скорости полета осесимметричного тела в трубе квадратного сечения. Исследована структура возникающей детонационной волны при скорости полета тела ниже скорости детонации, когда может наступать так называемая обгоняющая детонация. Проведено сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, полученными на комбинированной двухступенчатой системе, состоящей из эрозионного плазменного ускорителя и легкогазовой пушки.

A.V. TETEREV, I.M. KOZLOV, L.V. RUDAK, N.I. MISUCHENKO

*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

## COMBUSTION OF GAS MIXTURES INITIATED BY THE FLIGHT OF A BODY AT HYPERSONIC SPEED

Numerical modeling of combustion and its transition to detonation of flammable gas mixtures was carried out depending on the magnitude of the hypersonic flight speed of an axisymmetric body in a square pipe. The structure of the resulting detonation wave has been studied at a body flight speed below the detonation speed, when the so-called overtaking detonation can occur. The results of numerical modeling are compared with experimental data obtained on a combined two-stage system consisting of an erosive plasma accelerator and a light gas gun.

Исследования по воспламенению горючей газовой смеси ударной волной, образованной летящим со сверхзвуковой скоростью объектом, впервые были выполнены в [1]. Подобные исследования важны, поскольку позволяют изучить важные особенности практически любых режимов горения. 3D численное моделирование воспламенения и горения стехиометрической водородно-воздушной смеси проводилось для различных гиперзвуковых скоростей сферической пули размером 6 мм, летящей в трубе квадратного сечения, сторона которого составляла 35 мм. Величина пространственного разрешения расчетной сетки при этом составляла 0.1 мм. В момент времени  $t = 0$  с пуля с нулевой скоростью помещалась в канал, горючая смесь в котором везде имела одинаковую начальную скорость  $v_0$ . Газодинамическая модель представляла собой систему уравнений Эйлера для сжимаемого невязкого газа, а химическая кинетика процесса горения описывалась с помощью системы обратимых химических реакций для многокомпонентной неравновесной смеси. В зависимости от величины скорости наблюдались различные режимы горения и перехода его в детонацию. Так, при скорости полета пули менее 1500 м/с детонация вообще не возникает, а при скоростях, значительно превышающих скорость детонации, происходит заметное изменение угла Маха в обтекающем потоке горючей смеси. Совершенно другая картина течения наблюдалась при скорости полета пули 1800 м/с, что меньше значения скорости детонации для данной смеси. В этом случае реализуется режим «обгоняющей детонации», названный так в [2] в связи с тем, что возникающая при этом детонационная волна обгоняет постепенно тело, ее породившее. Результаты моделирования показывают, что в пристеночной области трубы образуется маховское отражение,

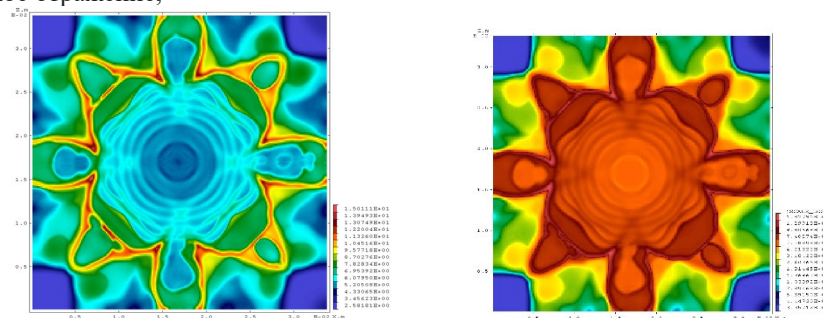


Рис. 1. Поля полной плотности слева и давления справа

которое начинает ускоряться и в итоге обгоняет летящую пулю. После того, как фронт детонационной волны отрывается от пули, между ним и пулей возникает интересная картина течения, поля плотности и давления которого изображены на рис. 1. Представленные поля напоминают картинки в калейдоскопе, что явно говорит о сложной пространственной структуре фронта детонационной волны.

### Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Шляпникох И.Я. // Докл. АН СССР. 1949. Т. 115. № 6. С. 871–874.
2. Васецкий В.А., Грищенко В.М., Лещевич В.В., Пенязьков О.Г. // VII ММК-2023: / Минск, 2023. С. 52–58

## МЕТОД РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ АЭС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КИНЕТИКИ ГОРЕНИЯ

Образуемая в результате нештатной аварии на атомной электростанции горючая смесь на основе водорода приводит к угрозе воспламенения и даже взрыва внутри контайнмента. Степень риска с точки зрения пожаро- и взрывоопасных ситуаций, возникающих при подобных авариях, оценивают обычно с помощью диаграммы Шапиро-Моффетте. Разработанная новая методика расчета водородной взрывобезопасности на основании адиабатической температуры сгорания, времени задержки воспламенения и максимальной скорости энерговыделения обладает определенными преимуществами перед традиционной методикой.

A.V. TETEREV, I.M. KOZLOV, N.I. MISUCHENKO, L.V. RUDAK  
Belarusian State University, Minsk, Belarus

## METHOD FOR CALCULATING HYDROGEN EXPLOSION SAFETY AT NPP POWER UNITS BASED ON THE RESULTS OF COMBUSTION KINETICS

A hydrogen-based flammable mixture arising as a result of an emergency accident at a nuclear power plant leads to the threat of ignition and even explosion inside the containment. The degree of risk in terms of fire and explosion situations arising from such accidents is usually assessed using the Shapiro-Moffette diagram. The developed new method for calculating hydrogen explosion safety based on the adiabatic combustion temperature, ignition delay time and maximum energy release rate has certain advantages over the traditional method.

Последовательность выполнения этапов предлагаемого метода расчета степени водородной взрывобезопасности следующая. В контайнмент АЭС, исходно заполненный воздушной средой с заданными параметрами, в определенных аварийных местах первого контура начинают поступать водяные пары, а затем и водород. Массовый расход, а также скорость и температура поступающих компонент смеси определяются заданными критическими сценариями, которые являются входными параметрами расчета. На протяжении всего времени моделирования ведется расчет газодинамического течения во всей области замкнутого пространства. В определенные моменты времени происходит приостановка расчета газодинамического течения и в каждой расчетной точке пространства проводится выгорание образовавшейся в ней смеси. Во время расчета кинетики горения фиксируются величина максимальной скорости энерговыделения, время достижения этого максимума, которое интерпретируется как время запаздывания воспламенения и наконец конечная температура выгорания в данной точке. В качестве основных выходных параметров выводятся поля взрывобезопасности на основе либо диаграммы Шапиро-Моффетте [1], либо модифицированной диаграммы Шапиро-Моффетте [2], а также перечисленные выше результаты расчета химической кинетики. Последние приведены на рис.1 на момент времени 214 с после начала аварии. Отчетливо видно, что каждая из приведенных величин по-своему характеризует степень взрывобезопасности образовавшейся к данному моменту горючей смеси.

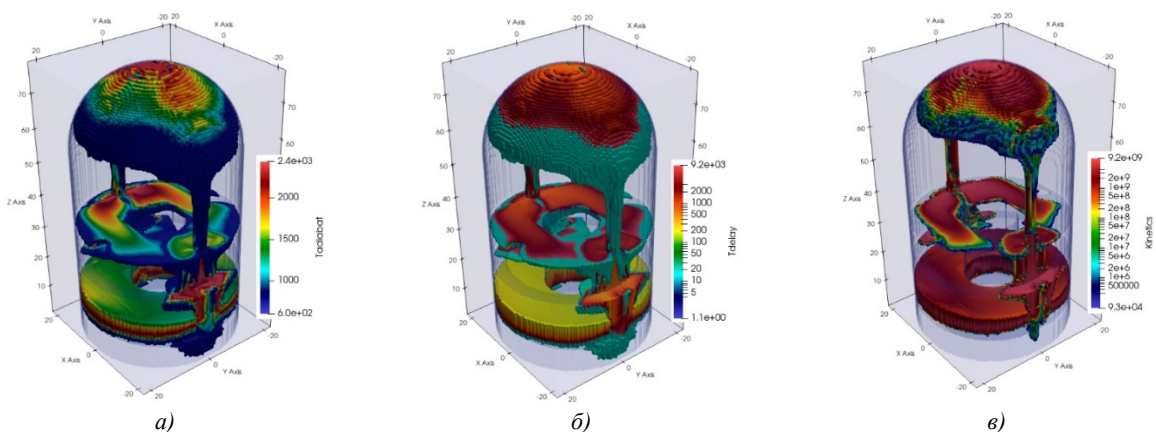


Рис. 1. Поля температуры сгорания, времени запаздывания воспламенения и максимальной скорости энерговыделения

Анализ результатов моделирования говорит о большой информативности предлагаемого метода расчета взрывобезопасности водородно-воздушных смесей, возникающих при тяжелых запроектных авариях на АЭС.

### Список литературы

1. Shapiro Z.M., Moffette T.R. // 1957. WAPD-SC-545.
2. Тетерев А.В., Козлов И.М., Мисюченко Н.И., Рудак Л.В. // VII ММК-2023, Минск, 2023. С. 237-242.

В. В. ЦЕГЕЛЬНИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

## О НЕКОТОРЫХ СВОЙСТВАХ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ ДВУХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Исследованы аналитические свойства решений двух нелинейных дифференциальных уравнений, ассоциированной с моделями случайно-матричного типа.

V. V. TSEGEL'NIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

## ON SOME ANALYTICAL PROPERTIES OF SOLUTIONS OF A SYSTEM OF TWO DIFFERENTIAL EQUATIONS

The analytical properties of solutions of a two differential equations associated with models of a random matrix type are investigated.

Доклад посвящен изложению результатов исследования некоторых свойств решений системы дифференциальных уравнений

$$u = \frac{1}{2(1-v^2)} \left( \frac{nv}{kz} - v' \right), \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{2(1-u^2)} \left( \frac{n+1}{kz} + v' \right) \quad (2)$$

с неизвестными функциями  $u, v$  независимой переменной  $z$  и параметрами  $k (k \neq 0), n$ .

Если  $k=1, n$  – дискретный параметр, то система (1), (2) [1,2] ассоциируется с уравнением [3]

$$u'_n = -(1-u^2)(u_{n+1} - u_{n-1}),$$

представляющим дискретную версию второго уравнения Пенлеве и модифицированным уравнением Вольтера [4]

$$(n+1)u_n = z(u_{n+1} + u_{n-1})(1-u_n^2).$$

*Теорема 1.* Пусть  $v=v(z)$  – решение уравнения

$$v'' = -\frac{v}{1-v^2} v'^2 - \frac{v'}{kz} + \frac{n(k-1)}{k^2 z^2} \cdot \frac{v^3}{1-v^2} + \frac{n(n+1-k)}{k^2 z^2} \cdot \frac{v}{1-v^2} - 4v(1-v^2). \quad (3)$$

Тогда функция  $u(z)$ , определяемая формулой (1), является решением уравнения

$$u'' = -\frac{u}{1-u^2} u'^2 - \frac{u'}{kz} + \frac{(n+1)(1-k)}{k^2 z^2} \cdot \frac{u^3}{1-u^2} + \frac{(n+1)(n+k)}{k^2 z^2} \cdot \frac{u}{1-u^2} - 4u(1-u^2). \quad (4)$$

*Теорема 2.* Пусть  $u=u(z)$  – решение уравнения (4). Тогда функция  $v(z)$ , определяемая формулой (2), является решением уравнения (3).

Уравнение (4) получается из (3) преобразованием  $v \rightarrow u, n \rightarrow -n-1$ .

*Теорема 3.* Система (1), (2) в случае  $k=1$  является системой Пенлеве-типа.

### Список литературы

1. Hisakado M. // Mod. Phys. Lett. 1996. Vol. A 11. P. 3001-3010.
2. Tracy C. A., Widom H. // Com. Math. Phys. 1999. Vol. 207. P. 665-685.
3. Nijhoff F. W., Papageorgiou V. // Phys. Lett. 1991. Vol. 153A. P. 337-344.
4. Kharchev S., Marshakov A., Mironov A., Zabrodin A. // 1991. Vol. B 366. P. 569-601.
5. Э. Л. Айнс. Обыкновенные дифференциальные уравнения. ОНТИ. Харьков. 1939.

## ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ БАЕРА-НУНЦИАТО

В настоящее время большую популярность набирает использование сверхкоротких лазерных импульсов для поверхностной модификации материалов [1]. Одним из примеров подобного рода процессов является поверхностное упрочнение металлов [2]. В силу того, что характерное время рассматриваемых задач крайне мало, численное моделирование становится крайне важным инструментом исследования. В литературе можно встретить использование разнообразных методов, таких как Эйлера гидродинамика, молекулярная динамика, SPH. Каждый из них обладает своими недостатками и преимуществами. В настоящей работе рассматриваются аспекты применимости к вышеупомянутым задачам модели Баера-Нунциато [3]. Эта модель позволяет учитывать наличие нескольких материалов в области и контактную границу между ними, при этом обладая достаточной простотой и быстродействием. Результаты, полученные представленной моделью, сравнивались с результатами молекулярно-динамического и однофазного гидродинамического моделирования.

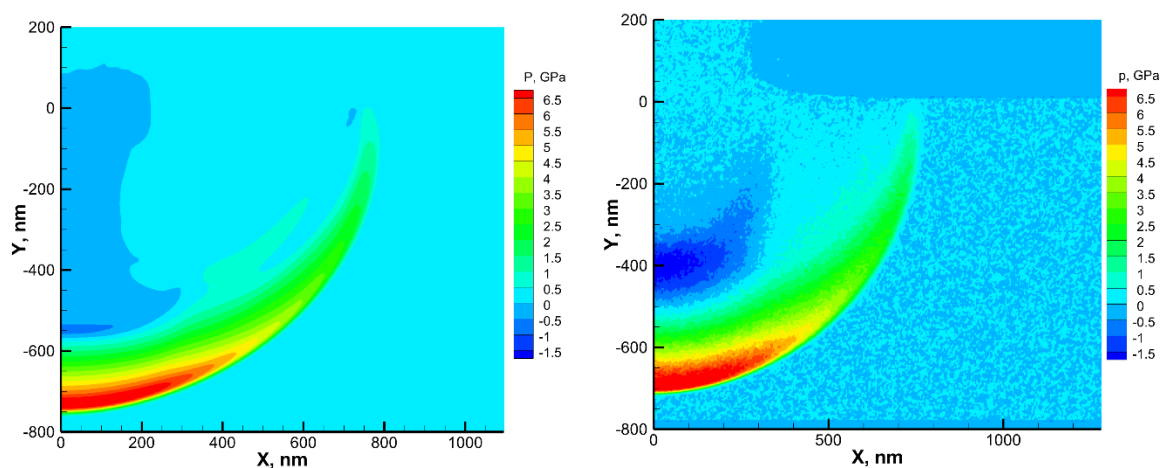


Рисунок 1. Сравнение результатов моделирования облучения объёмной алюминиевой мишени с результатами молекулярно-динамического моделирования. Слева - рассматриваемая модель, справа – МД

### Список литературы

1. N.A. Inogamov et. al. Surface nanodeformations caused by ultrashort laser pulse.
2. V.V. Shepelev, Yu.V. Petrov, N.A. Inogamov, V.V. Zhakhovsky, E.A. Perov, S.V. Fortova, Attenuation and inflection of initially planar shock wave generated by femtosecond laser pulse
3. M.R. Baer and J.W. Nunziato. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials

П. А. ЧУПРОВ<sup>1</sup> П. С. УТКИН<sup>2</sup>

*1 Институт автоматизации проектирования РАН, Вторая Брестская 19/18, Москва 123056, Россия*

*2 Harbin Institute of Technology, Xida 92, Nangang, Harbin, Heilongjiang 150001, China*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ БАЕРА-НУНЦИАТО**

В настоящей работе исследуется возможность численного моделирования распространения ударной волны над поверхностью слоя плотно упакованных частиц, лежащих на твёрдой стенке, при помощи модели Баера-Нунциато. Постановка задачи соответствует натурному эксперименту. Математическая модель основана на двумерной системе уравнений Баера-Нунциато [1] с учётом межгранулярных напряжений в фазе частиц [2]. Вычислительный алгоритм основан на методе HLL вместе с процедурой релаксации давлений. Проведено сравнение результатов с расчётами других авторов и натурным экспериментом [3]. Полученные геометрические параметры деформированного слоя хорошо соответствуют имеющимся данным, в том числе и зависимость этих параметров от интенсивности проходящей волны. В настоящей работе предлагается объяснение этой зависимости.

### *Список литературы*

1. Baer M R and Nunziato J W 1986 Int. J. Multiphase Flow 12 861–889
2. Poroshyna Ya E and Utkin P S 2021 Int. J. Multiphase Flow 142 103718
3. Fan B C, Chen Z H, Jiang X H and Li H Z 2007 Shock Waves 16 179–187

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО УРАВНЕНИЯ ГИНЗБУРГА-ЛАНДАУ

Рассмотрены аналитические свойства решений комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау при определенных условиях на коэффициенты уравнения и вида неоднородности. Выдвигается гипотеза о необходимом условии ограниченности решений в форме распространяющейся волны, на основании фазовых портретов. Найдены частные решения в форме разделяющихся переменных.

I.E. SHIPITSYN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ANALYTIC SOLUTION OF THE COMPLEX GINZBURG-LANDAU EQUATION

The analytical properties of solutions of the complex Ginzburg-Landau equation under certain conditions on the coefficients of the equation and the type of inhomogeneity are considered. A hypothesis is put forward about the necessary condition for limited solutions in the form of a propagating wave, based on phase portraits. Partial solutions in the form of separable variables are found.

В этой работе исследуются свойства аналитических решений модифицированного комплексного уравнения Гинзбурга-Ландау.

$$iq_t + q_{xx} = \left\{ \alpha \frac{(|q|^2)_x}{|q|^2} - (\beta - \alpha) \frac{(|q|^2)_x}{|q|^2} - F(|q|^2) \right\} q$$

Уравнение можно рассматривать как частный случай обобщенного нелинейного уравнения Шредингера с нелинейной диссипацией, качественно описывающая нестабильное и хаотическое состояние неравновесной среды.[1,2] Существует множество решений этого уравнения с различными видами нелинейности и условиями на коэффициенты  $\alpha = 2\beta$ . [3, 4, 5]

Заметим, что решение обладает особенностями в случае, если функция  $q$  обладает нулями(полюсами), из чего возникает вопрос, а какие условия на коэффициенты уравнения необходимо поставить для того, чтобы решение имело нули(полюса). Для начала можно рассматривать функцию  $q$  как аналитическую функцию по  $x$ . Если  $q$  имеет нуль  $k$ -ого порядка, то записать как  $q = (x - x_0)^k \psi$  (аналогично для полюса  $q = \frac{\psi}{(x - x_0)^k}$ ). Подставляя решение в такой форме, и приравнявая коэффициент при , получаем необходимые условия существования нулей и полюсов в следующей форме:

Если решение исходного уравнения аналитично по переменной  $x$  и обладает нулем(полюсом) в точке  $x_0$ , то дробь  $\frac{1 - 2\alpha}{1 + 4(\beta - \alpha)}$ , является целым ненулевым числом, причем если число положительно, то имеем нуль, иначе полюс.

Помимо существования нулей и полюсов решения, ещё одним важным свойством является ограниченность. Мы ограничимся исследованием в частном случае - решения в форме распространяющейся волны, тогда мы можем свести исходное уравнение в частных производных к обыкновенному дифференциальному уравнению, для которого можно провести анализ на предмет устойчивости. Построив фазовые портреты получим необходимое условие неограниченности решения: если решение исходного уравнения с нелинейностью в виде  $F(u) = u$  в форме распространяющейся волны не ограничено, то  $\alpha > 1/2$ . В текущей работе результат был обобщен и при других видах нелинейности, таких как: степенная, квадратичная, и обратная.

В качестве особого случая рассмотрим ограничение на коэффициенты вида  $\beta - \alpha = -1/4$ , и  $F(u) = 0$ . Здесь имеется интересный случай, а именно, если  $q$  и  $p$  - решения исходного уравнения, то и  $qp$  - решение. Благодаря такому свойству, для поиска аналитических решений достаточно взять два решения, одно зависит только от  $t$ , второе от  $x$ , причем переменные легко разделяются. Получаем следующее семейство решений  $q = A \exp(-\omega(x-p)(x-p) / (1-2\alpha) - i\omega t + i\varphi)$  (решения в форме гауссианов).

### Список литературы

1. Emmanuel Yomba, Timoléon Crépin Kofané, Exact solutions of the one-dimensional modified complex Ginzburg-Landau equation, Chaos, Solitons & Fractals, Volume 15, Issue 1, 2003, Pages 187-199
2. Stenflo L, Yu MY, Shukla PK. Phys Scripta 1989;40:257.
3. Nikolay A. Kudryashov, First integrals and general solution of the complex Ginzburg-Landau equation, Applied Mathematics and Computation 386 (2020) 125407
4. Hosseini, K. and Mirzazadeh, M. and Baleanu, D. and Raza, N. and Park, C. and Ahmadian, A. and Salahshour, S., The generalized complex Ginzburg Landau model and its dark and bright soliton solutions, European Physical Journal Plus, 2021, 136, 7, 709.
5. Mirzazadeh, M., Ekici, M., Sonmezoglu, A. et al. Optical solitons with complex Ginzburg-Landau equation. *Nonlinear Dyn* 85, 1979-2016 (2016)

**Секция  
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМЫЙ  
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ**

Руководитель секции

- к.ф.-м.н., доцент кафедры №21  
Гаспарян Ю.М.

Секретарь секции

- инженер кафедры №21  
Аксенова А.С.

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9321

E-mail: YMGasparyan@mephi.ru, ASAksenova@mephi.ru

## ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ КТМ В 2023 ГОДУ

В работе представлены данные последних экспериментальных кампаний на токамаке КТМ, полученные в 2023 году. Приводятся условия проведения экспериментов и обсуждаются полученные результаты.

B.ZH. CHEKTYBAYEV, I.L. TAZHIBAYEVA, E.A. KASHIKBAYEV,  
S.A. ZHUNISBEK, A. ZH. DUSEN  
*Branch Institute of Atomic Energy of RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

## OVERVIEW OF EXPERIMENTAL RESULTS ON THE KTM TOKAMAK IN 2023

The paper presents data from the recent experimental campaigns on the KTM tokamak, obtained in 2023. The conditions for conducting experiments on the KTM and the obtained results are discussed.

В настоящее время на комплексе токамака КТМ активно ведутся работы по выводу установки на рабочие параметры плазменного разряда для последующего проведения полномасштабных исследований материалов первой стенки, а также физики плазмы [1-3]. Расчетные рабочие параметры плазменного разряда КТМ: однонулевая диверторная конфигурация с вытянутостью  $k=1,7$ , ток плазмы 750 кА, плотность  $5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  с длительностью плазменного разряда в режиме омического нагрева около 1 с и в режиме с дополнительным ВЧ нагревом около 5 с [4, 5].

В работе представлены результаты последних экспериментов на КТМ, проведенных в 2023 году. Одной из основных задач, решаемых в 2023 году на КТМ – было получение плазменных разрядов с диверторной конфигурацией. Все эксперименты проводились в режиме с омическим нагревом плазмы. Помимо получения плазмы с диверторной конфигурацией также проводились эксперименты по получению стабильных повторяющихся разрядов с лимитерной квазикруглой конфигурацией с предельной длительностью, ограниченной на момент проведения экспериментов запасом потока в центральном соленоиде при его перемагничивании от +15 кА до -20 кА.

Амплитуда тока плазмы в экспериментах была ограничена уровнем 500 кА. Во всех разрядах средняя плотность плазмы не превышала значения  $(1 \div 2) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Для получения и удержания плазмы на КТМ используются контуры быстрого управления плазмой по току и положению.

В результате проведенных экспериментов впервые на токамаке КТМ были получены плазменные разряды с однонулевой диверторной конфигурацией с вытянутостью  $k=1,7$  с током плазмы 500 кА, длительностью до 1 с. Также были получены разряды с лимитерной квазикруглой конфигурацией ( $k < 1,4$ ) с длительностью до 2 с.

В ходе проведенных исследований на токамаке КТМ были получены новые экспериментальные данные по плазменному разряду с диверторной конфигурацией и приобретен уникальный экспериментальный опыт. Полученные данные и достигнутые параметры разряда позволят перейти к экспериментам по дальнейшему повышению параметров разряда до расчетных рабочих значений.

### *Список литературы*

1. B. Chektybayev, S. Zhunisbek, I. Tazhibayeva, D. Olkhovik, E. Batyrbekov, D. Zarva, A. Korovikov, A. Lee, V. Pavlov, E. Kashikbayev, A. Zhaksybayeva, A. Duisen, Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges, Fusion Engineering and Design, Volume 194, 2023, 113847, ISSN 0920-3796, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113847>.
2. Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber. Chektybayev, B., Sadykov, A., Batyrbekov, E., Lee, A., Pavlov, V. Fusion Engineering and Design, 2021, 163, 112167. DOI 10.1016/j.fusengdes.2020.112167
3. Сравнение рабочих параметров токамака КТМ с операционными пределами установки. Б.Ж. Чектыбаев, Н.А. Кирнева, А.М. Белов, Д.А. Ольховик, Д.В. Рыжаков, Д.С. Сергеев, М.Л. Субботин, И.Л. Тажибаева, П.П. Хвостенко, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2.
4. E.A. Azizov, et al., Kazakhstan tokamak for material testing conceptual design and basis parameters, Fusion Eng. Des. 56-57 (2001) 831–835.
5. I.L. Tazhibayeva, et al., KTM experimental complex project status, Fusion Sci. Technol. 47 (April) (2005) 746–750, <https://doi.org/10.13182/FST05-A775>.



М.Е. СУХОВИЦКАЯ<sup>1,2</sup>, В.Д. ПУСТОВИТОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## УЧЕТ ТОРОИДАЛЬНОСТИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СИЛ НА СТЕНКУ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА

Развит метод вычисления горизонтальных сил на стенку вакуумной камеры токамака с учетом тороидальных эффектов в линейном приближении. Получено выражение, позволяющее выполнить аналитические оценки.

M.E. SUKHOVITSKAYA<sup>1,2</sup>, V.D. PUSTOVITOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ACCOUNT OF TOROIDICITY IN CALCULATION OF SIDEWAYS FORCES ON THE VACUUM VESSEL WALL IN A TOKAMAK

A method for calculating the sideways forces on the vacuum vessel in a tokamak is proposed that takes into account the toroidal effects in the linear approximation. An expression derived allowing analytical estimates.

В работе [1] рассчитывалась сила на стенку камеры токамака, действующая в фиксированном горизонтальном направлении в цилиндрическом приближении. Здесь развивается аналитический подход к вычислению этой силы с учетом поправок, возникающих при учете тороидальности.

Рассматривается тороидальная плазма, отделенная от металлической стенки тороидальной камеры вакуумным зазором. Полная электромагнитная сила, действующая на стенку и плазму в горизонтальном направлении  $X$ , определяется выражением  $(\mathbf{F}_w + \mathbf{F}_{pl}) \cdot \mathbf{e}_X = \int_V (\mathbf{j} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{e}_X dV$ , при этом в силу малости массы плазмы в токамаке можно считать [2], что  $\mathbf{F}_{pl} = \int_{pl} \mathbf{j} \times \mathbf{B} dV = 0$ . Сила на стенку возникает из-за развития возмущения  $\mathbf{b}$  магнитного поля  $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{b}$ , где  $\mathbf{B}_0$  — аксиально-симметричная равновесная составляющая. Нахождение этой силы  $F_X^w = F_X^{out} - F_X^{in}$  сводится к вычислению двух контурных интегралов [1]

$$F_X^\alpha = \oint_\alpha [(\mathbf{e}_X \cdot \mathbf{b})\mathbf{B}_0 + (\mathbf{e}_X \cdot \mathbf{B}_0)\mathbf{b} - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{B}_0)\mathbf{e}_X] \cdot d\mathbf{S}_\alpha,$$

где  $\alpha = \{in, out\}$  обозначает внутреннюю поверхность стенки и внешнюю соответственно,  $d\mathbf{S}_\alpha$  — элемент площади, ориентированный по внешней нормали. Условие  $F_X^{in} = 0$  определяет структуру моды.

В квазицилиндрических координатах  $(r, \theta, \zeta)$ , связанных с центром плазмы, получается выражение для силы

$$F_X^\alpha = r_w R_0 \oint_\alpha \left[ \frac{R}{R_0} B_{0\theta} b_r \sin \theta \cos \zeta - B_0 b_r \sin \theta + \left( \frac{R}{R_0} B_{0\theta} b_\theta + B_0 b_\zeta \right) \cos \theta \cos \zeta \right] d\theta d\zeta + f_X^\alpha, \quad (1)$$

где  $B_0 = \text{const}$  — тороидальное поле в вакууме в центре тороидальной камеры,  $R_0$  — больший радиус тора,  $R = R_0 - r \cos \theta$ . Кроме того, в отдельное слагаемое  $f_X^\alpha$  выделен вклад от  $B_{0r} \neq 0$ . Полный учет тороидальности приводит к тому, что слагаемое с  $B_0 b_r$ , выпадающее в цилиндрическом приближении, дает ненулевой вклад.

Магнитное поле  $\mathbf{b}$  в вакууме описывается потенциалом  $\varphi$ , удовлетворяющим уравнению Лапласа. Следуя [3], для учета тороидальности решаем его с подстановкой  $\Phi = \varphi \sqrt{R/R_0}$ . С учетом представления  $2\pi \mathbf{B}_0 = \nabla \psi \times \nabla \zeta + \mu_0 I \nabla \zeta$ , и выражения для полоидального потока [4]  $\psi = \psi_0(r) + \psi_1(r) \cos \theta$ , где  $|\psi_1| \ll |\psi_0|$ , проведен анализ величин, входящих в (1) и показано, что основная поправка к силе с учетом тороидальности в линейном приближении по малому параметру  $\varepsilon_w = r/r_w$  оказывается порядка 20%.

### Список литературы

1. Mironov D. V., Pustovitev V. D. Sideways force due to coupled kink modes in tokamaks // Physics of Plasmas 2017. V. 24(9): 092508.
2. Pustovitev V. D. Models and scalings for the disruption forces in tokamaks // Nuclear Fusion. 2022. V. 62(2): 026036.
3. Morozov A. I., Solov'ev L. S. The Structure of Magnetic Fields // Reviews of Plasma Physics / Ed. by M. A. Leontovich. Gosatomizdat, Moscow, 1963. V. 2. P.3-90.
4. Pustovitev V. D. Dependence of disruption forces on the plasma position inside the vacuum vessel in tokamaks // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. V. 62(6): 065003.

А.Ю. ТОКАРЕВ<sup>1</sup>, А.Ю. ЯШИН, Н.С. ЖИЛЬЦОВ<sup>1,2</sup>, Г.С. КУРСКИЕВ<sup>2</sup>, В.Б. МИНАЕВ<sup>2</sup>, Ю.В. ПЕТРОВ<sup>2</sup>, А.М. ПОНОМАРЕНКО<sup>1</sup>, Н.В. САХАРОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ПИЛИНГ-БАЛЛОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

На сферическом токамаке Глобус-М2 наблюдаются разные виды периферийных локализованных мод: синхронизированные с пилообразными колебаниями и десинхронизированные. В данном докладе представлены результаты исследования десинхронизированных периферийных локализованных мод различными диагностиками. Анализируются: данные диагностики Томсоновского рассеяния, зондовых диагностик, диагностики Допплеровского обратного рассеяния. Показано, что во время срыва ELM происходит не только изменение профиля давления плазмы, но и возрастает по модулю радиальное электрическое поле.

A.YU. TOKAREV<sup>1</sup>, A.YU. YASHIN<sup>1,2</sup>, G.S. KURSKIEV<sup>2</sup>, V.B. MINAEV<sup>2</sup>, YU.V. PETROV<sup>2</sup>, A.M. PONOMARENKO<sup>1</sup>, N.V. SAKHAROV<sup>2</sup>, N.S. ZHILTSOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEVELOPMENT OF PEELING-BALLOONING INSTABILITY ON THE SPHERICAL TOKAMAK GLOBUS-M2

Different types of edge-localized modes are observed on the spherical tokamak Globus-M2: synchronized with sawtooth oscillations and desynchronized. This report presents the results of a study of desynchronized edge-localized modes using various diagnostics. Data of the Thomson scattering diagnostic, probe diagnostics, Doppler backscattering diagnostics are analyzed. It is shown that during the ELMs burst, not only a change in the plasma pressure profile occurs, but also the modulus of the radial electric field increases.

Основной режим работы токамаков – режим улучшенного удержания плазмы [1]. Он характеризуется большими градиентами давления на периферии плазмы, что приводит к появлению большого количества магнитогидродинамических неустойчивостей. Одними из самых распространённых являются периферийные локализованные моды (ELM) [2]. Они приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из плазмы на стенки камеры и пластины дивертора. На больших установках это может привести к их повреждению. Из-за этого исследование ELM является важной задачей.

Для описания периферийных локализованных мод используют модель пилинг-баллонной неустойчивости [3]. В ней выделяют 2 причины их возникновения: градиент давления со стороны слабого магнитного поля (баллонная мода) и ток, протекающий вблизи сепаратрисы (пилинг мода). ELM можно классифицировать на более чем 5 типов. На большинстве токамаков с большим аспектным отношением, наблюдается тип-I и тип-III, а также несколько других типов. На сферических токамаках периферийные локализованные моды типа-I практически не встречаются [4]. Предположительно, это связано с возникновением микропинг неустойчивости, влияющей на потоки энергии.

Глобус-М2 в ФТИ им. Иоффе в Санкт-Петербурге также является сферическим токамаком. На нем наблюдаются разные виды периферийных локализованных мод: синхронизированные с пилообразными колебаниями, происходящими в зоне перемешивания внутри области  $q = 1$ , и десинхронизированные. Последние относятся к типу-III или V [5]. В данном докладе представлены результаты исследования десинхронизированных ELM различными диагностиками, установленными на токамаке Глобус-М2. Анализируются данные диагностики Томсоновского рассеяния, зондовых диагностик, диагностики Допплеровского обратного рассеяния. Показано, что во время срыва ELM происходит не только изменение профиля давления плазмы, но и возрастает по модулю радиальное электрическое поле.

### Список литературы

1. Wagner F., Becker G., Behringer K. and others // Phys. Rev. Lett. 1982 V. 49. P. 1408.
2. Leonard A.W. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. P. 090501.
3. Connor J.W., Kirk A., Wilson H.R. // AIP Conf. Proc. 2008. V. 1013. P. 174–190.
4. Maingi R., Hubbard A.E., Meyer H. and others // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. P. 063036.
5. Solokha V.V., Kurskiev G.S., Yashin A.Yu. and others // Plasma Phys. Rep. 2023. V. 49. P. 419–427.

В.Ю. САВИН<sup>1,2</sup>, В.Д. ПУСТОВИТОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ГЕНЕРАЦИЯ ТОКА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В КРУГЛОМ ТОКАМАКЕ С ЗАЗОРОМ ПЛАЗМА-СТЕНКА

Для аксиально-симметричного токамака с магнитными поверхностями круглого сечения получено выражение для тока убегающих электронов (УЭ) при срыве с учетом вакуумного зазора и резистивности стенки вакуумной камеры. В целом анализ следует схеме, предложенной в [1], но с более реалистичным описанием геометрии эксперимента. Показано, что фактор генерации тока УЭ  $\gamma$  (логарифм отношения тока УЭ в конце срыва к току до срыва) тем больше, чем больше ширина зазора между границей плазмы и стенкой токамака.

V.Y. SAVIN<sup>1,2</sup>, V.D. PUSTOVITOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov institute», Moscow, Russia

## GENERATION OF THE RUNAWAY ELECTRON CURRENT DURING DISRUPTIONS IN A ROUND TOKAMAK WITH A VACUUM GAP PLASMA-WALL

For an axisymmetric tokamak with magnetic surfaces of circular cross-section, an expression for the runaway electron (RE) current during disruption is obtained, taking into account the vacuum gap and the resistivity of the vacuum chamber wall. In general, the analysis follows the model proposed in [1], but with a more realistic description of the experiment geometry. It is shown that the RE current generation factor  $\gamma$  (logarithm of the ratio of the RE current at the end of the disruption to the current before the disruption) is greater, the larger the gap width between the plasma boundary and the tokamak wall.

Одной из причин повреждений первой стенки токамака является большой поток тепловой энергии, локально выносимый высокоэнергичными убегающими электронами [1, 2]. Механизмы генерации УЭ (особенно по лавинному принципу как вносящему наибольший вклад в генерацию) и ее подавления исследуются уже несколько десятилетий [3, 4, 5, 6], и их изучение всё ещё остается актуальным. Связано это с тем, что рост числа УЭ по лавинному механизму во время срыва разряда описывается уравнением

$$\frac{\partial \ln J_{RE}}{\partial t} = \frac{1}{\tau_r} \frac{E_\zeta}{E_C},$$

(1)

где  $J_{RE}$  – ток УЭ,  $E_C$  и  $\tau_r$  – критическое поле и характерное время генерации УЭ соответственно,  $E_\zeta$  – тороидальное электрическое поле. Выражение (1), полученное из стандартных законов кинетической теории в работах [3, 6], применимо при  $E_\zeta \gg E_C$  и произвольных значениях эффективного заряда плазмы и часто используется при анализе генерации УЭ [1, 2, 4, 5]. Само же поле  $E_\zeta$  определяется временной эволюцией магнитного поля  $\vec{B}$ , которое меняется из-за падения тока плазмы и зависит от параметров плазменного разряда и геометрических характеристик установки.

Как и в работах [1, 2], описывается падение тока плазмы (Current Quench) по экспоненциальному закону с некоторым характерным временем спада  $\tau_{res}$ . Этот процесс рассматривается от начала срыва (момент перехода от стационарной работы токамака к срыву разряда) до момента, когда полный ток плазмы переносится только УЭ (режим плато). Поле  $E_\zeta$  при этом находится из системы для эволюции тока плазмы  $J_p$  и тока в стенке камеры  $J_w$

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}(L_p J_p + M J_w) = -2\pi R_0 E_\zeta - \frac{d\psi_{ext}}{dt}, \\ \frac{d}{dt}(M J_p + L_w J_w) = -J_w R_w - \frac{d\psi_{ext}}{dt}. \end{cases}$$

(2)

Здесь  $L_p$ ,  $L_w$ ,  $M$  – индуктивность плазмы, стенки и взаимная индуктивность соответственно,  $R_w$  – сопротивление стенки,  $R_0$  – большой радиус плазмы,  $\psi_{ext}$  – внешний магнитный поток.

Однако, в отличие от работы [1], здесь учитывается ненулевой зазор между плазмой и стенкой камеры, что приводит к дополнительной генерации убегающих электронов (увеличение тока почти на 6 порядков) и требует дополнительных мер по снижению тока УЭ.

### Список литературы

1. Martín-Solís J.R., Loarte A., Lehnen M. //Physics of Plasmas. 2015. Vol. 22, № 8. P. 1-12.
2. Martín-Solís J.R., Loarte A., Lehnen M. //Nuclear Fusion. 2017. Vol. 57, № 6. P. 1-28.
3. Gurevich A.V. //Sov. Phys. JETP. 1961. V. 12, № 5. P. 904-912.
4. Rosenbluth M.N., Putvinski S.V. //Nuclear fusion. 1997. V. 37, № 10. P. 1355-1362.
5. Putvinski S.V. //Nuclear fusion. 1998. V. 38, № 9. P. 1275-1281.
6. Breizman B.N. et al. //Nuclear Fusion. 2019. V. 59, № 8. P. 1-55

О.Д. КРОХАЛЕВ<sup>1,2</sup>, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ<sup>1</sup>, А.В. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский Физико-Технический Институт (Национальный Исследовательский Университет), Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАСЧЁТ ТРАЕКТОРИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ТОРОИДАЛЬНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

Разработана библиотека на языке Python 3, позволяющая проводить расчёты магнитных и электрических полей и траекторий зондирующих частиц для диагностики плазмы зондированием пучком тяжёлых ионов в тороидальных термоядерных установках и код для токамака Т-15МД на основе данной библиотеки. Проведенные расчёты траекторий, детекторных сеток и ослабления пучка в плазме токамака Т-15МД показали возможность проведения измерений в интервале  $\rho \approx 0.35-0.9$  в режиме с тороидальным полем 1.5 Тл и током плазмы 1.5 МА.

O.D. KROKHALEV<sup>1,2</sup>, L.G. ELISEEV<sup>1</sup>, A.V. MELNIKOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## TRAJECTORIES CALCULATIONS FOR HEAVY ION BEAM PROBE DIAGNOSTIC OF TOROIDAL FUSION DEVICES PLASMAS

Library on Python 3 for calculations of magnetic and electrostatic fields, probing ion trajectories in toroidal fusion devices is developed. Calculations with code for tokamak T-15MD, based on that library, demonstrated possibility of measurements with heavy ion beam probe in T-15MD plasmas in regimes with toroidal field on axis 1.5 T and plasma current 1.5 MA in radial diapason  $\rho \approx 0.35-0.95$ .

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПИ) – уникальный метод диагностики плазмы в установках с магнитным удержанием. ЗПИ позволяет проводить измерения электрического потенциала плазмы, его колебаний, а также колебаний концентрации электронов и полоидального магнитного поля в горячей зоне плазменного шнура [1]. Как разработка диагностики ЗПИ, так и интерпретация результатов измерения требует расчётов траекторий зондирующих частиц в магнитном поле установки  $B$  и электрических полях пластин  $E$ , управляющих траекторией пучка. Для прецизионных расчётов траекторий была разработана библиотека на языке Python 3, ориентированная на работу с высоким пространственным разрешением полей (1 мм для  $E$  и 1 см для  $B$ ), и код для Т-15МД на её основе.

В работе описаны методы расчёта магнитного и электрического полей, траекторий зондирующих ионов, подбора напряжений на отклоняющих пластинах ионопроводов, определения положения областей измерения, расчёта ослаблений пучка ионов при пролёте через плазму. Приведены результаты расчётов детекторных сеток и ослабления пучка диагностики НИВР для токамака Т-15МД [2] в режиме работы с полем  $B_t = 1.5$  Тл и током плазмы  $I_{pl} = 1.5$  МА.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

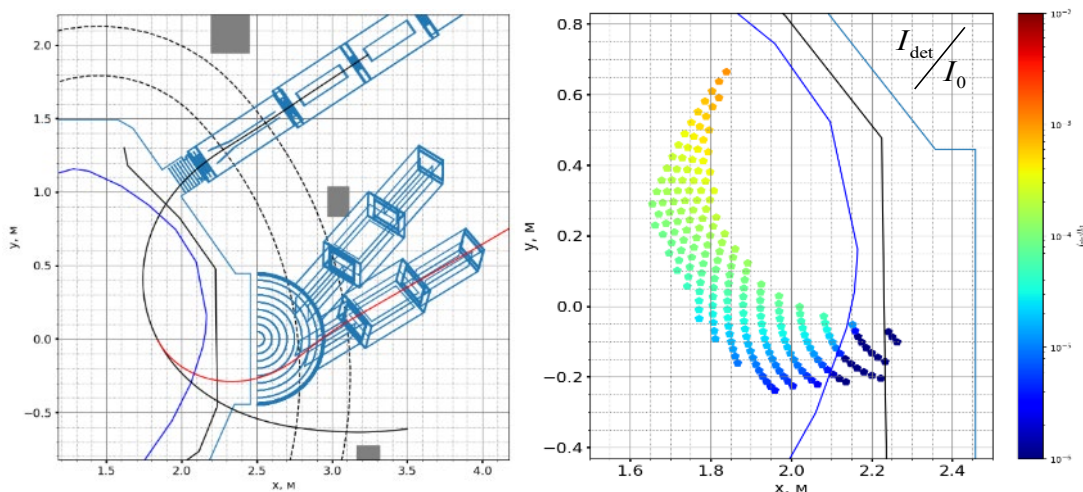


Рис. 1. (а) Траектория зондирующих ионов в токамаке Т-15МД. Чёрным – первичная траектория, красным – вторичная.  
(б) Распределение ослабления пучка зондирующих ионов в токамаке Т-15МД в режиме работы с  $B_t = 1.5$  Тл и  $I_{pl} = 1.5$  МА.

### Список литературы

1. Jobs F. C. and Hickok R. L. // Nucl. Fusion, 1970, 10, 195-197.
2. Хвостенко П.П. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 2019, Т. 42 (1), С. 15-38.

ПАШКОВ И.И., ПРИШВИЦЫН А.С., ЕФИМОВ Н.Е., ПОДОЛЯКО Ф.С., А.С. БЕЛОВ, КРАТ С.А.  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0**

Получен сценарий осуществления плазменного пробоя в токамака МИФИСТ-0. Параметры плазмы в начале разряда изучены экспериментально.

I.I. PASHKOV, A.S. PRISHVITSYN, N.E. EFIMOV, F.S. PODOLYAKO, A.S. BELOV, S.A. KRAT  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **STUDY AND OPTIMIZATION OF INITIAL DISCHARGE STAGE IN MEFHIST-0 ТОКАМАК**

A plasma breakdown scenario was obtained for MEFHIST-0 tokamak. Plasma parameters during initial discharge stage were measured experimentally.

Начальная стадия разряда в токамаках является важной его частью, так как в ходе нее определяется будет ли сформирован токовый шнур в нужной конфигурации. В ходе начальной стадии разряда, происходит ионизация рабочего газа, появление и рост тока по плазме, формирование замкнутых магнитных поверхностей.

Токамак МИФИСТ-0 – сферический токамак с большим радиусом  $R=24$  см, малым радиусом  $a=13$  см, аспектным соотношением 1.9, вертикальной вытянутостью по камере  $\sim 2.2$ . Остаточный вакуум составляет  $\sim 10^{-6}$  мБар и достигается после  $\sim 1$  суток откачки без необходимости прогрева камеры. Система электропитания катушек токамака построена на тиристорных ключах, которые коммутируют различные емкости на обмотки токамака. В данный момент для включения катушек управления используются три тиристорных ключа и конденсаторы различной емкости, что позволяет создавать различные сценарии токов по катушкам, необходимые для формирования начальной магнитной конфигурации и базовым управлением положения плазменного шнура. Для облегчения начала разряда на токамаке используется система СВЧ предыонизации основанная на магнетроне с частотой 2,45 ГГц и мощностью 3 кВт.

Экспериментально выявлено, что разряд в токамаке «МИФИСТ-0» не может быть инициирован при использовании исключительно центрального соленоида, так как создаваемые им рассеянные магнитные поля слишком велики. Для формирования необходимой для пробоя конфигурации магнитного поля требуется использование полоидальных катушек, то есть разработка сценария токов по различным частям магнитной системы.

Для решения данной задачи была создана модель магнитных полей токамака МИФИСТ-0 в среде COMSOL Multiphysics. По известным токам в катушках токамака, модель рассчитывает распределение магнитных полей с течением времени с учетом токов, наводимых в вакуумной камере. При помощи данной модели был разработан сценарий токов по катушкам, приводящий к формированию необходимой «нулевой» конфигурации магнитного поля в начале разряда.

В ходе работы с использованием ряда диагностик был исследован разрабатываемый сценарий начала разряда. Плотность плазмы, создаваемой системой предыонизации была измерена СВЧ интерферометром с несущей частотой 94 ГГц и тройным электрическим зондом. Для измерения магнитных полей внутри камеры для подгонки модели, а также для обнаружения пробоя и измерения положения плазменного шнура был использован набор магнитных зондов и внутрикамерный пояс Роговского. Плотность получаемого плазменного шнура была также измерена СВЧ и ИК интерферометрами, а также тройным электрическим зондом.

А.Д. ИЗАРОВА<sup>1,2</sup>, А.Ю. БАЛАШОВ<sup>1</sup>, А.М. БЕЛОВ<sup>1,3</sup>, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ<sup>1</sup>, Г.А. САРАНЧА<sup>1,4</sup>,  
А.В. СТЁПИН<sup>1</sup>, А.В. СУШКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный научный центр Российской Федерации ТРИНИТИ, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

## ПРИМЕНИМОСТЬ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ЗОНДОВ МИРНОВА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СТРУКТУРЫ МГД-АКТИВНОСТИ ПЛАЗМЫ В НЕКРУГЛОМ ТОКАМАКЕ

В работе рассмотрен ряд методов обработки данных зондов Мирнова в целях детектирования и определения пространственной структуры МГД-возмущений в плазме некруглого токамака (двумерное Фурье-разложение, метод преобразования Гильберта, метод выделения сингулярных значений, метод фазовых матриц). Проведено моделирование сигнала, возникающего на зондах, конфигурация которых соответствует системе, установленной на токамаке Т-15 МД, под действием различных комбинаций мод. Синтетический сигнал обработан с помощью перечисленных методов, выявлено влияние параметров мод и их сочетания на корректность получаемых результатов.

A.D. IZAROVA<sup>1,2</sup>, A.Y. BALASHOV<sup>1</sup>, A.M. BELOV<sup>1,3</sup>, L.G. ELISEEV<sup>1</sup>, G.A. SARANCHA<sup>1,4</sup>,  
A.V. STEOPIN<sup>1</sup>, A.V. SUSHKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC 'Kurchatov Institute', Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI), Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (NRU), Dolgoprudniy, Russia

## THE APPLICABILITY OF SIGNAL PROCESSING METHODS OF MIRNOV COILS IN THE STUDY OF THE STRUCTURE OF MHD PLASMA ACTIVITY IN A NON-CIRCULAR ТОКАМАК

The paper considers a number of methods for processing Mironov probe data in order to detect and determine the spatial structure of MHD disturbances in tokamak plasma (two-dimensional Fourier decomposition, Hilbert transform method, singular value decomposition method (SVD), phase matrix method). The simulation of the signal generated by magnetic probes, which configuration corresponds to the system installed on the tokamak T-15 MD, under the influence of various combinations of modes, is carried out. The synthetic signal was processed using the selected methods, the influence of the mode parameters and their combination on the correctness of the results obtained was revealed.

Ряд конструктивных особенностей токамака Т-15МД, таких как некруглое сечение и относительно высокая тороидальность, усложняют обработку данных зондов Мирнова, с помощью которых производится обнаружение и исследование МГД-возмущений. Это приводит к необходимости выбора такого метода обработки сигналов, который позволил бы минимизировать влияние искажающих факторов на получаемый результат.

В ходе работы проанализированы следующие методы: двумерное Фурье-разложение, комбинация метода преобразования Гильберта [1] и метода выделения сингулярных значений, метод фазовых матриц [2]; а также реализован дополнительный алгоритм предобработки сигналов, способствующий получению более корректного результата. Написанные программы протестированы на синтетических сигналах с различными параметрами, что позволило определить границы применимости методов. Результаты обработки зашумлённого синтетического сигнала, являющегося композицией двух мод на различных временных частотах и учитывающего непостоянство пространственной частоты по полоидальному углу (преобразование Мережкина [3]), полоидальную асимметрию амплитуд и расположение зондов по D-образному полоидальному сечению камеры токамака, представлены на рис. 1.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИИЦ «Курчатовский институт».

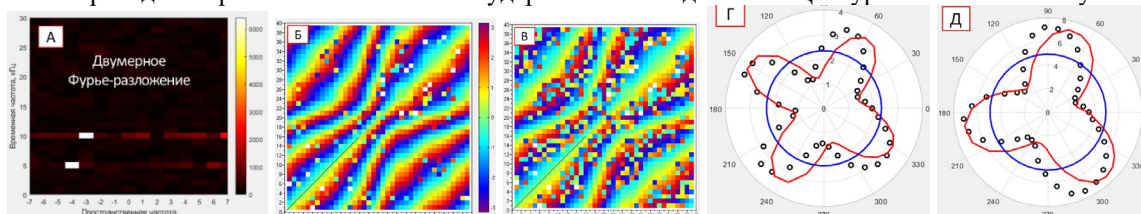


Рис. 1 А – Матрица двумерного Фурье-разложения композиции мод с полоидальными модовыми числами  $m=4$  и  $m=3$

Б, В - Матрицы кросс-фазы выделенных мод  $m=4$  и  $m=3$ . По осям расположены номера магнитных зондов

Г, Д - Моды  $m=4$  и  $m=3$  выделенные SVD (чёрные точки) с обработкой преобразованием Гильберта (красные линии)

Список литературы

[1]. Kakurin A.M. Orlovsky I.I. Identification of the Structure of Large-Scale MHD Perturbations in a Tokamak from Mironov Signals// Plasma Physics Reports, Vol. 29, No. 10, 2003, pp. 826–830

[2]. Melnikov A. V. et al. Quasicoherent modes on the COMPASS tokamak //PPCF. – 2015. – Т. 57. – №. 6. – С. 065006.

[3]. Мережкин, В.Г. Структура возмущений магнитного поля при развитии неустойчивости срыва в установке Токамак-6, Москва, Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова. Препринт, 29 с., 1977

И.БАЙДИН, А. МОЗГОВОЙ, А. ОГИНОВ, К. ШПАКОВ, И. ТИЛИКИН, А.РОДИОНОВ, Е.  
ПАРКЕВИЧ, Х. СМАЗНОВА

*Физический ин-т им. П.Н. Лебедева РАН*

## **СОЗДАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ПУТЕМ СТОЛКНОВЕНИЯ ДВУХ КОМПАКТНЫХ ТОРОВ**

Осесимметричная конфигурация замкнутого витка с током в плазме получила название компактный тор или FRC -- Field Reversed Configuration. Торы можно ускорять и сжимать магнитными полями. В настоящее время в Национальной Лаборатории США в Лос Аламосе создается новая экспериментальная платформа для исследования FRC. Известны частные американские компании - Tri Alpha Energy (освоено более \$ 1.2 млрд., из них 50 млн. от Роснано) и Helion Energy - последняя даже анонсировала в 2024 году выдачу энергии в сеть со своего нового термоядерного коллайдера Polaris (инвестировано в 2021 г. \$ 570 млн., с обязательством еще \$ 1.2 млрд, главный инвестор - Sam Altman, компаньон Elon Musk по Open AI, заключен контракт с Майкрософт на поставку первого реактора в 2028 г). Крупнейшая сталелитейная компания Америки Nucor также заключила контракт с Helion Energy на \$ 35 млн. Частными компаниями в мире, занятыми термоядерными исследованиями, уже привлечено более \$ 6 млрд. Китай, Япония, Англия, Германия также ведут исследования в этой области. Российская программа Росатома РГТН "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» (33, 375 млрд. руб.) предусматривает строительство второго плазменного ускорителя в ТРИНИТИ для создания коллайдера двух плазмоедов.

Работы проводятся и в Физическом институте им. П. Н. Лебедева совместно с ООО «Знаю как». Был предложен и запатентован новый способ формирования компактных торов в индуктивных накопителях энергии [1]. Данный метод показал высокую эффективность преобразования магнитной энергии накопителя - до 70 процентов запасенной энергии передается в плазмоед, ток достигал несколько десятков килоампер при диаметре плазмоеда 30 см, а его скорость составила 40 км/сек. Два плазмоеда, ускоренных навстречу друг друга, дали в месте столкновения температуру плазмы более 1 кэВ и длительность мягкого рентгеновского излучения около одной микросекунды, что на три порядка превышает длительность такого излучения на установках с Z, X-пинчем и плазменным фокусом [2]. Это показывает реальную возможность осуществления инерциального термоядерного синтеза.

Многочисленное ускорение тороидов – это и новый вид электроракетных двигателей для космоса.

Предлагаем создать коллаборацию для осуществления исследований по этой теме с привлечением ведущих научных организаций России и дружественных стран, а также инвестиционных компаний для подачи совместной заявки в ВЭБ РФ на 3 млрд руб., и в Фонд Прямых Инвестиций.

Быстрая модернизация установок может быть реализована во ВНИИЭФ, НИЦ Курчатовский институт, новосибирском ИЯФ, ТРИНИТИ, НИИП, ФИАН, томском ИСЭ, где уже есть экспериментальные установки с квази-мегаджоульной энергетикой.

### *Список литературы:*

1. Патент РФ № RU 2523427 Способ формирования компактного плазмоеда
2. <https://efre2022.hcei.tsc.ru/publication/proceedings.html> (S2-O-043801- FRC collider)

Е.А. ВИНИЦКИЙ<sup>1,2</sup>, О.Д. КРОХАЛЕВ<sup>1,3</sup>, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ<sup>1</sup>, Я.М. АММОСОВ<sup>1,3</sup>, Н.А. ВАДИМОВ<sup>1</sup>,  
М.А. ДРАБИНСКИЙ<sup>1</sup>, И.А. ШЕЛЕГЕДА<sup>1,4</sup>, Г.А. САРАНЧА<sup>1,3</sup>, А.В. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (НИУ), Москва, Россия

<sup>4</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ), Москва, Россия

## МАТРИЧНЫЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА Т-15МД

В работе продемонстрирована возможность применения матричного детектора для диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПИ) в условиях токамака Т-15МД. Были выбраны предварительные расположение и параметры матричного детектора. Для трех режимов с тороидальным полем  $B_T$  1.2; 1.5; 1.7 Тл были определены радиальный диапазон измерений и диапазон полоидальных углов, доступных для измерений. Отмечено, что для выбранных режимов возможны одновременные измерения с помощью матричного детектора и одного из энергетических анализаторов. Проведена оценка пространственного разрешения для матричного детектора с выбранными параметрами.

Е.А. VINITSKIY<sup>1,2</sup>, O.D. KROKHALEV<sup>1,3</sup>, L.G. ELISEEV<sup>1</sup>, Y.M. AMMOSOV<sup>1,3</sup>, N.A. VADIMOV<sup>1</sup>, M.A. DRABINSKIY<sup>1</sup>, I.A. SHELEGEDA<sup>1,4</sup>, G.A. SARANCHA<sup>1,3</sup>, A.V. MELNIKOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## MULTIPLE CELL ARRAY DETECTOR FOR HEAVY ION BEAM PROBE DIAGNOSTIC ON T-15MD

The possibility of using a multiple cell array detector (MCAD) for heavy ion beam probe diagnostic (HIBP) in the T-15MD tokamak was demonstrated. The preliminary location and parameters of the MCAD were chosen. For three regimes with toroidal field  $B_T$  1.2, 1.5, and 1.7 T, the radial range of measurements and the range of poloidal angles available for measurements were determined. It is noted that for the selected regimes simultaneous measurements with MCAD and one of the energy analyzers are possible. The spatial resolution of the MCAD with the selected parameters was evaluated.

На базе токамака Т-15МД в НИЦ «Курчатовский Институт» проводится проектирование диагностики зондирования плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПИ) [1]. Дополнением, расширяющим возможности данной диагностики, служит матричный детектор ЗПИ [2]. Данный инструмент предназначен для диагностики плазменной турбулентности в термоядерных установках, позволяет измерять колебания плотности плазмы  $\tilde{n}_e$  и полоидального поля плазмы  $\tilde{B}_p$ . Матричный детектор может использоваться для изучения структуры плазменных колебаний, исследования переходных процессов (L-H переход, формирование ИТВ), изучение длин корреляций и их эволюции.

В рамках работы были определены параметры матричного детектора: вертикальное расположение детектора  $y_d = 0.4$  м, высота и длина детектора  $L_z = 19$  см  $L_x = 15$  см, а также размер ячеек детектора  $dL = 1 \times 1$  см<sup>2</sup>. Выбранные параметры матричного детектора обеспечивают максимальную площадь области наблюдения, гарантируют отсутствие прямого контакта между плазмой и матричным детектором и учитывают геометрические размеры ЗПИ для Т-15МД. Для предложенных параметров матричного детектора были определены радиальный диапазон измерений и диапазон, доступных для измерений полоидальных углов в случае трех режимов  $B_T = 1.2; 1.5; 1.7$  Тл. Была показана возможность проведения одновременных измерений с помощью одного из энергетических анализаторов и матричного детектора ЗПИ для всех рассматриваемых режимов. Проведены оценки падения интенсивности сигнала на матричном детекторе при ионизации частицы в плазме для двух вариантов профилей электронной и ионной температур, электронной плотности [3]. Для выбранных профилей были получены области наблюдения с учетом падения интенсивности сигнала, приходящего на матричный детектор. В работе были предложены дополнительные методы защиты от излучения плазмы, которые могут применяться в ходе эксплуатации матричного детектора в состав ЗПИ. Для режима  $B_T = 1.5$  Тл была сделана оценка пространственного разрешения матричного детектора:  $dL = (0.9; 2.5)$  см.

### Список литературы

1. Drabinskiy, M. A., et al. "Conceptual design of the heavy ion beam probe diagnostic for the T-15MD tokamak." Journal of Instrumentation 14.11 (2019): C11027.
2. Beckstead, J. A., et al. "A spatial detector array for measuring plasma turbulence with the heavy ion beam probe." Review of scientific instruments 68.1 (1997): 328-331.
3. Леонов, В. М. "Исследование условий получения квазистационарных режимов в токамаке Т-15МД." ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез 39.3 (2016): 73-79.



Я.М. АММОСОВ<sup>1,2</sup>, Е.А. ВИНИЦКИЙ<sup>1,3</sup>, О.Д. КРОХАЛЕВ<sup>1,2</sup>, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ<sup>1</sup>, Н.А. ВАДИМОВ<sup>1</sup>,  
М.А. ДРАБИНСКИЙ<sup>1</sup>, И.А. ШЕЛЕГЕДА<sup>1,4</sup>, Г.А. САРАНЧА<sup>1,2</sup>, А.В. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (НИУ)

<sup>3</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>4</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## РАСЧЁТ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПИ) – уникальная диагностика, позволяющая независимо и одновременно измерять электрический потенциал плазмы  $\varphi_{pl}$ , его колебания  $\tilde{\varphi}_{pl}$ , а также колебания электронной плотности  $\tilde{n}_e$  и величины полоидального магнитного поля  $\tilde{B}_p$  в горячей области плазмы. В работе приведены результаты расчёта пространственного разрешения проектируемой диагностики ЗПИ для токамака Т-15МД. Исследована зависимость размера области измерения от ширины входных щелей в энергетический анализатор.

Y.M. AMMOSOV<sup>1,2</sup>, E.A. VINITSKY<sup>1,3</sup>, O.D. KROHALEV<sup>1,2</sup>, L.G. ELISEEV<sup>1</sup>, N.A. VADIMOV<sup>1</sup>,  
M.A. DRABINSKY<sup>1</sup>, I.A. SHELEGEDA<sup>1,4</sup>, G.A. SARANCHA<sup>1,2</sup>, A.V. MELNIKOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (NRU)

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## CALCULATION OF SPATIAL RESOLUTION OF THE HEAVY ION BEAM PROBE FOR T-15MD TOKAMAK

Heavy ion beam probe (HIBP) is a unique diagnostic that allows independent and simultaneous measurement of the plasma electric potential  $\varphi_{pl}$ , its fluctuations  $\tilde{\varphi}_{pl}$ , as well as fluctuations of the electron density  $\tilde{n}_e$  and the poloidal magnetic field  $\tilde{B}_p$  in the hot plasma region. The paper presents the results of calculation of the spatial resolution of HIBP for the T-15MD tokamak. The dependence of the size of the measurement area on the width of the input slits in the energy analyzer is investigated.

Зондирующий пучок ионов  $Ti^+$  инжектируется в плазму и вторично ионизуется в каждой точке своей траектории, образуя веер вторичных траекторий. Часть этого веера попадает во входную щель энергетического анализатора, а затем на его детектор. Область плазмы, в которой произошла вторичная ионизация является локальной областью измерения ЗПИ. Варьируя начальную энергию и угол влёта пучка в плазму можно перемещать область измерений по вертикальному сечению плазменного шнура и получить детекторную сетку. По сигналам детектора можно определить электрический потенциал плазмы в области ионизации и его колебания, а также колебания электронной плотности и магнитного поля тока плазмы [1]. С помощью ЗПИ успешно проводились исследования потенциала и турбулентности на токамаке Т-10 [2-4] и стеллараторе TJ-II (Испания) [5, 6].

В настоящее время разрабатывается проект двойного диагностического комплекса ЗПИ для токамака Т-15МД. Важной задачей является определение пространственного разрешения диагностики. Для ЗПИ на токамаке Т-15МД планируется использовать энергетический анализатор с 7-ю входными щелями, одновременно измеряющий параметры плазмы в 7-ми пространственных областях, что позволит исследовать их пространственные корреляции. В данной работе были определены размеры области измерения диагностики ЗПИ для каждой входной щели энергетического анализатора по детекторной сетке. Исследована зависимость размера области измерения от ширины входной щели энергетического анализатора.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИИЦ «Курчатовский институт».

### Список литературы

1. Melnikov A. Evolution of Heavy Ion Beam Probing from the Origins to Study of Symmetric Structures in Fusion Plasmas // *Symmetry*. 2021. V. 13(8):1367. DOI: 10.3390/sym13081367.
2. Melnikov, A. V. [et al.] Heavy ion beam probe design and operation on the T-10 tokamak // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 146:850–853. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2019.01.096.
3. Ammosov, Y.M., Khabanov, P.O., Drabinskiy, M.A. [et al.] Measurements of the Radial Distributions of the Geodesic Acoustic Mode and Quasi-Coherent Mode Using a Heavy Ion Beam Probe in the T-10 Tokamak Ohmic Plasma // *Phys. Atom. Nuclei*. 2022. V. 85:2071–2075. DOI: 10.1134/S1063778822100040.
4. Ammosov, Y.M., Khabanov, F.O., Drabinskiy, M.A. [et al.] Methodology for Constructing 2D Distributions of Plasma Parameters Using Heavy Ion Beam Probe Data on the T-10 Tokamak // *Phys. Atom. Nuclei*. 2023. V. 86:2115–2123. DOI: 10.1134/S106377882309003X.
5. Melnikov, A. V. [et al.] Heavy ion beam probing – a tool to study geodesic acoustic modes and Alfvén eigenmodes in the T-10 tokamak and TJ-II stellarator // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2017. V. 107(23). P. 237–240.
6. A. V. Melnikov, L. G. Eliseev, J. M. Barcala [et al.] 2D distributions of potential and density mean-values and oscillations in the ECRH and NBI plasmas at the TJ-II stellarator // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2022. V. 64:054009. DOI: 10.1088/1361-6587/ac5b4c.

Н.Е. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, Р.И. ХУСНУТДИНОВ<sup>1,2</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>, А.Б. КУКУШКИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ РАСПЫЛЕНИЯ БЕРИЛЛИЕВОЙ И ВОЛЬФРАМОВОЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА ИТЭР АТОМАМИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА

Проведены расчеты отражения атомов изотопов водорода от первой стенки и распыления бериллия и вольфрама кодом SDTrimSP и расчеты кинетики нейтральных атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме баллистической моделью BM1D2V. Получены оценки распыления бериллия и вольфрама с первой стенки вакуумной камеры токамака ИТЭР.

N.E. EFIMOV<sup>1</sup>, R.I. KHUSNUTDINOV<sup>1,2</sup>, Y.M. GASPARYAN<sup>1</sup>, A.B. KUKUSHKIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

## ASSESSMENT OF ITER TOKAMAK BERYLLIUM AND TUNGSTEN FIRST WALL SPUTTERING BY HYDROGEN ISOTOPE ATOMS

Calculations of the reflection of hydrogen isotope atoms from the first wall and the sputtering of beryllium and tungsten using the SDTrimSP code and calculations of the kinetics of neutral atoms and molecules of hydrogen isotopes in the wall plasma using the BM1D2V ballistic model are carried out. Estimates of the sputtering of beryllium and tungsten from the first wall of the vacuum chamber of the ITER tokamak are obtained.

Задача оценки эрозии первой стенки является критической при управлении термоядерной установкой. Для прогнозирования процессов эрозии важно создание быстрого кода расчета рециклинга изотопов водорода в пристеночной плазме, который был бы протестирован путем сравнения со сложными численными кодами, наиболее успешным примером такого рода является код EIRENE [1]. В настоящей работе приведены результаты использования такого быстрого численного кода BM1D2V [2], основанного на полуаналитической баллистической модели [3, 4] и соответствующем быстром коде BM1D1V [5]. Баллистическая модель была разработана как простая, вычислительно эффективная модель, позволяющая рассчитывать функцию распределения по скоростям (ФРС) атомов и молекул изотопов водорода в пристеночной плазме токамака путем итеративного решения кинетического уравнения для ФРС атомов и упрощенного решения кинетического уравнения для ФРС молекул. Код BM1D2V был дополнен модулем [6], позволяющим оценить распыление материала первой стенки атомами водорода в пристеночной плазме. Данное дополнение позволило сравнить распыление бериллия и вольфрама при одинаковых параметрах пристеночной плазмы.

Для оценки распыления материала первой стенки с помощью кода SDTrimSP [7] были рассчитаны коэффициенты отражения атомов изотопов водорода от первой стенки и коэффициенты распыления бериллия и вольфрама. Коэффициенты распыления использованы в расчетах модифицированным кодом BM1D2V [6].

В настоящей работе представлены результаты расчетов модифицированным кодом BM1D2V для задачи эрозии бериллия и вольфрама как материалов первой стенки токамака. Расчет рециклинга водорода в пристеночной плазме и распыления бериллия производился в двух сценариях, с высокой и низкой плотностью плазмы в пристеночном слое на стороне сильного магнитного поля в токамаке ИТЭР. Профили параметров плазмы (температура и плотность ионов и электронов) были взяты, как и в [5], из расчета кодом SOLPS4.3 [8] сценария №2252 работы дивертора ИТЭР. Оценки показали, что плотность потока бериллия в данных сценариях составила  $\sim 10^{18}$  Ве/м<sup>2</sup>с, в то время как плотность потока вольфрама на четыре порядка ниже, около  $\sim 10^{14}$  W/м<sup>2</sup>с. Порядок величины эрозии бериллия совпадает с потоками, рассчитанными кодом ERO2.0 в сценариях 7 и 8 в [9].

### Список литературы

1. Reiter D., Baelmans M. and Börner P. 2005 *Fusion Sci. Tech.* **47** 172 (<https://doi.org/10.13182/FST47-172>), [www.eirene.de](http://www.eirene.de)
2. Р.И. Хуснутдинов, А.Б. Кукушкин, В.С. Неверов. 2021 *Материалы XXIV конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 4-5 января 2021г.)* стр. 14-17
3. Kadomtsev M.B., Kotov V., Lisitsa V.S. and Shurygin V.A. 2012 *Proc. 39th EPS Conf. 16th Int. Congress on Plasma Physics (Stockholm, Sweden, 2-6 July 2012)* p P4.093 (<http://ocs.ciemat.es/epsicpp2012pap/pdf/P4.093.pdf>)
4. Lisitsa V.S., Kadomtsev M.B., Kotov V., Neverov V.S. and Shurygin V.A. 2014 *Atoms* **2** 195
5. Kukushkin A.B., Kukushkin A.S., Lisitsa V.S., Neverov V.S., Pshenov A.A., Shurygin V.A. *Plasma Phys. Contr. Fusion* **2021**
6. Р.И. Хуснутдинов, Н.Е. Ефимов, Ю.М. Гаспарян, А.Б. Кукушкин. 2024 *Материалы XXVII конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью» (Москва, 24-25 января 2024г.)* стр. 53-56
7. A. Mutzke, R. Schneider, W. Eckstein, R. Dohmen, K. Schmid, U. von Toussaint, G. Badelow. (2019). *SDTrimSP Version 6.00* (IPP 2019-02). Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. (<https://doi.org/10.17617/2.3026474>)
8. Kukushkin A.S., Pacher H.D., Kotov V., Pacher G.W. and Reiter D. 2011 *Fusion Eng. Des.* **86** 2865
9. J. Romazanov et al 2022 *Nucl. Fusion* **62** 036011 (<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac4776>)

А.Б. КУКУШКИН, А.А. КУЛИЧЕНКО

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРА КРОСС-ФАЗЫ СИГНАЛОВ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ОТ МГД СКОРОСТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО СКОРОСТЯМ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ**

Ранее полученное аналитическое описание кросс-корреляционной рефлектометрии (ККР) флуктуаций плотности плазмы в токамаках позволяет найти МГД скорость полоидального вращения плазмы и распределение по скоростям радиального движения флуктуаций плотности плазмы в случае зондирования по направлению малого радиуса токамака и отражения от различных точек на одной магнитной поверхности в одном полоидальном сечении. Приведено сравнение результатов моделирования кросс-фазы сигналов ККР для таких экспериментов на токамаках T-10 и KSTAR.

A.B. KUKUSHKIN, A.A. KULICHENKO

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **DEPENDENCE OF THE CROSS-PHASE SPECTRUM OF TOKAMAK PLASMA REFLECTOMETRY SIGNALS ON MHD VELOCITY AND VELOCITY DISTRIBUTION OF PLASMA DENSITY FLUCTUATIONS**

The previously obtained analytical description of cross-correlation reflectometry (CCR) of plasma density fluctuations in tokamaks makes it possible to find the MHD velocity of poloidal rotation of the plasma and the velocity distribution of radial motion of plasma density fluctuations in the case of probing in the direction of the small radius of the tokamak for the reflection from various points on the same magnetic surface in one poloidal cross-section. A comparison of the results of modeling the cross-phase of CCR signals for such experiments on the T-10 and KSTAR tokamaks is presented.

При интерпретации экспериментальных данных радиальной и полоидальной кросс-корреляционной рефлектометрии (ККР) плазмы токамака электромагнитными (ЭМ) волнами радиочастотного диапазона особый интерес представляет анализ т.н. квазикогерентных колебаний, видимых в спектре рассеянного излучения как дублет широких спутников относительной частоты зондирующего излучения. Такие спектры были впервые обнаружены на токамаке T-10 [1], а впоследствии и на других токамаках: TEXTOR, FTU, ToreSupra, JET, ASDEX-Upgrade, KSTAR, HL-2A, J-TEXT.

Ранее концепция супердиффузии, связываемая в теории переноса с доминированием полетов Леви и прогулок Леви [2], был применен для описания кинетики движущихся флуктуаций плотности турбулентной среды [3, 4], а сформулированный алгоритм восстановления нелокальных свойств стохастических процессов в среде по спектрам рассеяния ЭМ волн и данным ККР был применен в интерпретации экспериментов [5] на токамаке T-10.

В данной работе подход [3] применен, в дополнение к анализу результатов ККР на токамаках T-10, TEXTOR и ASDEX-Upgrade, к результатам измерений на токамаке KSTAR [6]. Анализ данных KSTAR позволил установить возможную причину несовпадения наших результатов [3] для кросс-фазы с измерениями [5] на токамаке T-10, при том что при решении единой для всех данных обратной задачи удалось найти решения, близкие к экспериментальным данным для спектра рассеянного излучения, модуля корреляционной функции (кросс-модуля) и радиальной зависимости корреляционной функции. Оказалось, что наши расчеты кросс-фазы на KSTAR существенно ближе к результатам измерений, чем в случае данных с токамака T-10. Это объясним с точки зрения нашего аналитического результата [3] (ф. (66)): экспоненциальный фактор для немонаохроматического распределения по скоростям флуктуаций плотности плазмы дает малые значения производной спектра по частоте (т.е. почти платообразное поведение) фазы кросс-корреляционной функции в области его минимальной осцилляции, поскольку этот оператор под интегралом по скоростям приводит к взаимной компенсации фазы колебаний для флуктуаций с близкими амплитудами и частотами. Результаты для кросс-фазы рассеянного электрического поля на токамаках T-10 и KSTAR подсказывают необходимость дополнительного анализа как процедуры обработки результатов измерений, так и приближенной аналитической модели, так как кросс-фаза оказывается самым чувствительным компонентом измерений и теоретических моделей.

### *Список литературы*

1. Vershkov V.A., Soldatov S.V., Shelukhin D.A. // Proc. 16th Fusion Energy Conf, Montreal:Canada, Vienna:IAEA. 1996. Vol. 1, P. 519.
2. Zburdaev V., Denisov S., Klafter J. // Rev. Mod. Phys. 2015. Vol. 87. P. 483.
3. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. // Symmetry 2022. Vol. 14, № 6. P. 1265.
4. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. // Foundations 2023. 3. P. 602–620.
5. Urazbaev A.O., Vershkov V.A., Soldatov S.V., Shelukhin D.A. // Plas. Phys. Rep. 2006. Vol. 32. P. 443–460.
6. Lee W. et al // Plasma Phys. Control. Fusion 2018. Vol. 60. P. 115009.

Н.А. ВАДИМОВ<sup>1</sup>, Е.А. ВИНИЦКИЙ<sup>1,2</sup>, Л.Г. ЕЛИСЕЕВ<sup>1</sup>, Н.К. ХАРЧЕВ<sup>1,3</sup>, А.В. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,4</sup>,  
Г.А. САРАНЧА<sup>1,4</sup>, М.А. ДРАБИНСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Московский физико-технический институт (НИУ)

## ПОЛУЧЕНИЕ ДЛИННОФОКУСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОМ СТЕНДЕ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД

Изучена зависимость фокусного расстояния пучка ионов таллия  $Tl^+$  от параметров ионно-оптической системы инжектора диагностики плазмы зондированием пучком тяжелых ионов. Показана возможность получения квазипараллельных пучков и сходящихся пучков с фокусным расстоянием более 4 м. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования пролета пучка в инжекторе.

N.A. VADIMOV<sup>1</sup>, E.A. VINITSKY<sup>1,2</sup>, L.G. ELISEEV<sup>1</sup>, N.K. KHARCHEV<sup>1,3</sup>, A.V. MELNIKOV<sup>1,2,4</sup>,  
G.A. SARANCHA<sup>1,4</sup>, M.A. DRABINSKY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Institute of General Physics named after A.M. Prokhorov RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (NRU)

## ACHIEVING LONG-FOCUS ION BEAMS ON THE HIGH VOLTAGE TEST BENCH FOR HEAVY ION BEAM PROBE DIAGNOSTICS ON THE T-15MD TOKAMAK

The dependence of the focal distance of the thallium  $Tl^+$  ion beam on the parameters of the ion-optical system of the injector for heavy ion beam probe plasma diagnostics has been studied. The possibility of obtaining quasi-parallel beams and converging beams with a focal distance of more than 4 m is shown. Experimental results are compared with the results of computer modeling of the beam trajectory in the injector.

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) – уникальная диагностика, позволяющая проводить локальные прямые измерения электрического потенциала высокотемпературной плазмы по всему сечению плазменного шнура [1]. В настоящее время разрабатывается проект диагностики для токамака Т-15МД [2].

Для зондирования плазмы токамака Т-15МД ионный пучок должен иметь высокую интенсивность  $\geq 200$  мкА и фокусное расстояние в диапазоне 3–5 м. Необходимо точно фокусировать пучок в точке измерения во время эксперимента. Возможность получения пучков с заданным фокусным расстоянием изучается на высоковольтном стенде ЗПТИ токамака Т-15МД [3].

Угловая расходимость и интенсивность пучка определяются параметрами ионно-оптической системы (ИОС). Интенсивность пучка зависит от мощности нагрева эмиттера  $P_{fil}$  и вытягивающего напряжения  $U_{extr}$ , а фокусное расстояние – от комбинации вытягивающего, фокусирующего  $U_{foc}$  и ускоряющего  $U_{beam}$  напряжений.  $U_{beam}$  определяет также энергию ионов пучка.

Для определения положения точки фокуса на макете инжектора установлены четыре проволочных датчика. Отклоняясь от оси электрическим полем отклоняющих пластин, пучок попадает на проволоки датчиков, возбуждая в них ток. По сигналу тока пучка и расстоянию между проволоками определялся диаметр пучка. По данным о диаметре пучка в нескольких точках вдоль оси пучка можно определить его расходимость и фокусное расстояние.

В работе исследована зависимость характеристик пучка от напряжений на электродах ИОС ускорителя и мощности нагрева ионного эмиттера. Были получены квазипараллельные и сходящиеся пучки с током 5-10 мкА и энергией  $E_{beam} = 180$  кэВ. Найдены зависимости расходимости пучка от параметров ИОС. Показано, что  $U_{extr}$  напрямую влияет на расходимость пучка и его диаметр  $d$ , причём можно подобрать это напряжение так, что диаметр пучка на заданном расстоянии от инжектора будет минимальным. Получено  $d = 11$  мм при  $E_{beam} = 210$  кэВ,  $P_{fil} = 30$  Вт, на расстоянии 5 м. Приводится сравнение результатов эксперимента с численным моделированием пролёта пучка в стенде.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИИЦ «Курчатовский институт»

### Список литературы

1. Jobes F.C., Nickok R.L. A direct measurement of plasma space potential // Nuclear Fusion, 1970, 10(2), стр. 195
2. М.А. Драбинский, А.В. Мельников, Л.Г. Елисеев, Н.К. Харчев, С.Е. Лысенко, Ф.О. Хабанов, Н.А. Вадимов, О.Д. Крохалев, М.С. Горбун, Г.А. Саранча, Е.И. Гуцевич, Т.Ю. Прокофьева, К.О. Недбайлов О статусе двойной диагностики пучком тяжёлых ионов на токамаке Т-15МД // Сборник тезисов XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», Сочи, 2021, стр. 163-166
3. Vadimov N.A., Sarancha G.A., Drabinskiy M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Komarov O.D., High voltage test bench for heavy ion beam probe diagnostics on T-15MD tokamak // Вопросы атомной науки и техники, 2020, 130(6), стр.200-203

Д.Р. ФИЛИПЕНКО<sup>1,2</sup>, П.В. МИНАШИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## УПРОЩЕННЫЙ ЛУЧЕВОЙ КОД ДЛЯ РАСЧЕТА МНОГОПРОХОДНОГО ЭЦ-ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЭМ-ВОЛН ПЛАЗМОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ

Разработан новый код для расчета эффективности электронного циклотронного (ЭЦ) поглощения инжектированных в плазму ЭМ волн на начальной стадии разряда в токамаках. Новый код является упрощением для условий начальной стадии разряда лучевых кодов для расчета ЭЦ-нагрева плазмы: (1) применяется приближение прямолинейных траекторий для траекторий лучей, (2) используются аналитические коэффициенты поглощения ЭЦ-волн в разреженной максвелловской плазмы, (3) учитывается конверсия мод при отражении волны от стенки вакуумной камеры.

D.R. FILIPENKO<sup>1,2</sup>, P.V. MINASHIN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## SIMPLIFIED RAY TRACING CODE FOR CALCULATING THE MULTI-PASS EC-ABSORPTION OF INJECTED EM-WAVES IN PLASMA AT THE INITIAL STAGE OF DISCHARGE IN TOKAMAKS

A new code has been developed for calculating the efficiency of electron cyclotron (EC) absorption of electromagnetic (EM) waves injected into the plasma at the initial stage of discharge in tokamaks. The new code is a simplified version of ray-tracing codes for calculating the heating of plasma by EC waves for the conditions of the initial phase of discharge: (1) straight-line trajectory approximation for ray trajectories, (2) analytical coefficients for the absorption of EC waves in a tenuous Maxwellian plasma, and (3) mode conversion at wave reflection from the vacuum chamber wall.

Электронно-циклотронный (ЭЦ) резонансный нагрев используется в действующих токамаках как на квазистационарной стадии разряда для дополнительного нагрева плазмы, генерации неиндуктивного тока и подавления МГД неустойчивостей [1], так и на начальной стадии разряда для предионизации плазмы, преодоления радиационного барьера и увеличения скорости подъема тока [2]. ЭЦ-нагрев на начальной стадии разряда в больших токамаках (ИТЭР, ДЕМО) будет необходим, так как из-за технических особенностей одного омического нагрева будет недостаточно для надежного создания плазмы [3].

Температура и плотность плазмы на начальной стадии разряда в токамаках таковы ( $T_e=10-1000$  эВ,  $n_e=(0.1-1.0)\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), что невозможно реализовать полное ЭЦ-поглощение инжектированной в плазму электромагнитной (ЭМ) волны на одном проходе волны до отражения от первой стенки (эффективность однопроходного поглощения, т.е. доля поглощенной мощности, меньше 5% [4]). Поэтому в сценариях с ЭЦ-нагревом на начальной стадии разряда требуется учитывать многопроходное ЭЦ-поглощение волн. Моделирование многопроходного ЭЦ-поглощения можно проводить с помощью следующих подходов: (I) модифицированные лучевые коды для расчета ЭЦ-нагрева, в которых учтены нескольких проходов ЭЦ-волны, изменение поляризации ЭЦ-волн при отражении от стенки и поглощение волны в стенке (например, путем модификации [5] кода TORAY); (II) расчет многопроходного поглощения в приближении изотропного и однородного размешивания излучения после первого отражения от стенки вакуумной камеры [6] и мультирезонансная модель для расчета излучения, рассеянного при отражении ЭМ-волн, инжектированных системой ЭЦ-нагрева плазмы [7].

В работе предлагается новый код для расчета многопроходного ЭЦ-поглощения плазмой инжектированных ЭМ волн на начальной стадии разряда, который является упрощением лучевых кодов для условий начальной стадии разряда: (1) применяется приближение прямолинейных траекторий для траекторий лучей, (2) используются аналитические коэффициенты поглощения ЭЦ-волн в разреженной максвелловской плазмы [8], (3) учитывается конверсия мод при отражении волны от стенки вакуумной камеры [9].

### Список литературы

1. Prater R. // Physics of Plasmas. 2004. V. 11. PP. 2349-2376.
2. Stober J., Jackson G.L., Ascasibar E., Bae Y.S., et al. // Nuclear Fusion. 2011. V. 51. P. 083031.
3. Lloyd B., Carolan P.G., Warrick C.D. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 1996. V. 38. PP. 1627-1643.
4. Khayrutdinov R.R., Kuyanov A.Y., et al. // Proc. 38<sup>th</sup> EPS Conf. on Plasma Physics, France, 2011. ECA. V. 35G. P. P2.085.
5. Granucci G., Garavaglia S., Ricci D., Artaserse G., et al. // Nuclear Fusion. 2015. V. 55. P. 093025.
6. Minashin P.V., Kukushkin A.B., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. // EPJ Web of Conferences. 2015. V. 87. P. 03005.
7. Moseev D., Oosterbeek J.W., Sirinelli A., Corre Y., et al. // Fusion Engineering and Design. 2021. V. 172. P. 112754.
8. Bornatici M., Cano R., De Barbieri O., Engelmann F. // Nuclear Fusion. 1983. V. 23. P. 1153.
9. Hsu J.Y., Moeller C.P. // AIP Conference Proceedings. 1987. V. 159. PP. 13-16.

В.В. АНДРЕЕВ, А.А. НОВИЦКИЙ, А. НИАМАНЕШ  
*Российский университет дружбы народов РУДН, Москва, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ЭНЕРГИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ ПРИ АВТОРЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ДЛИННОМ ПРОБКОТРОНЕ

Предыдущие исследования продемонстрировали, что циклотронный авторезонанс, т. е. ЭЦР-взаимодействие в растущем во времени магнитном поле [1, 2] либо при его пространственном изменении [4, 5] приводит к образованию релятивистской плазмы с энергией электронной компонентой в несколько сотен кэВ. Во время этого процесса релятивистское изменение массы электрона компенсируется изменением магнитного поля, и резонансные условия сохраняются.

V.V. ANDREEV, A.A. NOVITSKY, A. NIAMANESH  
*RUDN University, Moscow, Russia*

## STUDY OF STRUCTURE AND DYNAMICS OF ENERGETIC PLASMA BUNCHES UNDER AUTORESONANT INTERACTION IN A LONG MIRROR TRAP

Previous studies [1, 2] have demonstrated that cyclotron autoresonance, i.e., EC resonance interaction in a time-increasing magnetic field and its spatial variation [4, 5], leads to the formation of relativistic plasma with an electron component energy of several hundred keV. During this process, the relativistic change in the electron's mass is compensated by a change in the magnetic field, and the resonant conditions are maintained.

В настоящей работе представлен вариант сценария циклотронного авторезонанса [1], демонстрирующий возможность создания долгоживущих плазменных сгустков с релятивистской электронной компонентой в симметричных локальных зонах длинного пробкотрона, а затем дрейфующих в стационарном магнитном поле с небольшим градиентом к центру ловушки, где электрическое поле СВЧ-моды равно нулю, а магнитное поле ловушки минимально [2]. Данный подход к авторезонансному взаимодействию не требует какого либо первичного ускорения частиц, а их инжекция в зону ускорения может быть реализована как извне [3], либо заполнение ловушки первичной плазмой осуществляется в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) [1-2].

Проведено детальное исследование спектрально-углового распределения тормозного и характеристического излучения в различных режимах работы, которое позволило определить оптимальное значение временного интервала между передним фронтом импульсного магнитного поля и СВЧ-импульсом, обеспечивающее оптимальный режим захвата электронов в режим циклотронного авторезонанса. Регистрируемое в поперечном направлении тормозное излучение (NaI(Tl) спектрометры) имеет значительно более высокую интенсивность и энергию фотонов по сравнению с продольным направлением как при ускорении, так и при последующем удержании плазменных сгустков. Для регистрации характеристического излучения применялись спектрометры X-123-CdTe и Si-Pin-X-123 откалиброванные по линиям  $\text{Am}^{241}$ . Анализ интенсивностей регистрируемых линий излучения рабочего газа ( $\text{Xe } K\alpha_1 = 29,775$  кэВ,  $\text{Kr } K\alpha_1 = 12,648$  кэВ) позволяет оценить поперечные потери электронов в пределах рабочего цикла ускорения (доля потерянных электронов составила не более 15%). Исследования изменения интенсивности характеристических линий рабочего газа, линий мишени (материал Mo 4x4 мм) и материала стенок камеры показали, что электроны ускоренного плазменного сгустка в процессе удержания локализованы в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в тонком цилиндрическом слое. Зависимость спектра и квантового выхода рентгеновского излучения показали, что в типичных экспериментальных условиях: электроны ускоренного плазменного сгустка в процессе удержания локализованы в минимуме пробочной ловушки и сконцентрированы в цилиндрическом слое; в типичных экспериментальных условиях высота слоя составляет – 3.75 см, а его диаметр не превышает 6.0 см; форма спектра и характеристики (квантовый выход, максимальная энергия) рентгеновского излучения в продольном и поперечном направлениях имеют радикальные отличия. Экспериментально определены изменения спектров тормозного и характеристического излучения с газовой мишени на различных временных интервалах стадии ускорения и удержания. На основе пакета для разработки программ GEANT4 проведены расчеты параметров генерируемого плазменными сгустками рентгеновского излучения при их взаимодействии с газовой и твердотельными мишенями вводимыми в область локализации сгустков, а также их потоков на стенки камеры удержания. Детальный анализ экспериментальных результатов совместно с результатами модельных расчетов позволили определить эффективность применяемых средств диагностики, а также параметры генерируемых плазменных сгустков в широком диапазоне рабочих параметров реализуемого сценария эксперимента.

### *Список литературы*

1. V. V. Andreev, D. V. Chuprov, V. I. Ilgisonis, A. A. Novitsky and A. M. Umnov, *Physics of Plasmas* 24, 093518, 2017.
2. V. V. Andreev, A. A. Novitsky, M. A. Korneeva and A. M. Umnov, *Plasma Physics Reports* 43, № 11, pp 1114–1118, 2017.
3. V.V. Andreev, A.A. Novitsky, L.A. Vinnichenko, A. M. Umnov, and D. O. Ndong *Plasma Physics Reports* 42, №3, pp 293–297, 2016.
4. A. I. Neishtadt and A. V. Timofeev *Sov. Phys. JETP* 66 (5), pp 973–977, November 1987.
5. R. Shpitalnik, C. Cohen, F. Dothan, and L. Friedland *Journal of Applied Physics* 70, 1101 (1991).

С.В. КУЗНЕЦОВ

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## УЕДИНЕННАЯ ИОННО-ЗВУКОВАЯ ВОЛНА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ

В кинетическом подходе для описания движения электронной компоненты неизоотермической плазмы в одномерной геометрии показано, что наряду с движением ионов и потоком захваченных электронов в направлении распространения ионно-звукового солитона в плазме также существует ток пролетных электронов, который обратен по знаку к току захваченных электронов. Установлено, что во всем диапазоне скоростей ионно-звукового солитона эти токи сопоставимы по величине. Поэтому учет движения солитона при определении функции распределения электронов по скоростям имеет принципиальное значение при исследовании электронных токов, протекающих в области солитона. Показано, что интегрально за все время нелинейного движения плазмы суммарный ток всех зарядов, проходящих через любое поперечное сечение в плазме, равен нулю. Следовательно, квазинейтральность плазмы сохраняется после прохождения по ней ионно-звукового солитона.

S.V. KUZNETSOV

*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## A SOLITARY ION-SOUND WAVE IN A NON-ISOTHERMAL COLLISIONLESS PLASMA

In the kinetic approach to describe the motion of the electronic component of a non-isothermal plasma in one-dimensional geometry, it is shown that along with the movement of ions and the flow of trapped electrons in the direction of propagation of the ion-sonic soliton in the plasma, there is also a current of flying electrons, which is reversed in sign to the current of trapped electrons. It has been established that these currents are comparable in magnitude over the entire range of velocities of the ion-sound soliton. Therefore, taking into account the motion of the soliton when determining the electron velocity distribution function is of fundamental importance in the study of electronic currents flowing in the soliton region. It is shown that integrally, for the entire time of nonlinear plasma motion, the total current of all charges passing through any cross-section in the plasma is zero. Consequently, the quasi-neutrality of the plasma is preserved after the passage of an ion-sound soliton through it.

Аналитически в одномерной геометрии исследован процесс распространения в бесстолкновительной неизоотермической плазме ионно-звукового солитона. Для описания электронной компоненты плазмы применяется кинетический подход с учетом движения солитона. Движение ионов описывается уравнениями гидродинамики.

Показано, что в данной модели кинетическое уравнение Власова для электронов и гидродинамика для ионов допускают решения в виде уединенной ионно-звуковой волны. Найдено, что главным параметром, определяющим возможность существования ионно-звукового солитона, является значение его скорости распространения в плазме. Солитон возможен только при сверхзвуковых скоростях распространения, причем, чем больше скорость солитона, тем большего значения достигает его амплитуда. Предел увеличению амплитуды солитона обуславливается явлением опрокидывания ионной компоненты плазмы.

Найдено, что в лабораторной системе координат наряду с переносом захваченных электронов в направлении распространения солитона существует поток пролетных электронов, направленный в противоположную сторону. Физическое объяснение появления тока пролетных электронов состоит в отсутствии симметрии по скоростям в функции распределения электронов, взаимодействующих с полем солитона, перемещающегося в пространстве. Электроны, которые попадают в потенциальную яму солитона, нагоняя его, меньше, чем электронов, которых нагоняет солитон. Электроны, нагоняющие солитон, проходя над ямой, увеличивают свою скорость, а вторые замедляются. В итоге возникает интегральный поток электронов в направлении противоположном направлению движения солитона. С учетом знака заряда это соответствует появлению электронного тока в направлении движения солитона.

Ток захваченных электронов всегда отрицательный, поэтому ток пролетных электронов уменьшает суммарный электронный ток. Показано, что во всем диапазоне скоростей ионно-звукового солитона эти токи сопоставимы по величине. Следовательно, учет движения солитона при определении функции распределения электронов по скоростям имеет принципиальное значение при исследовании электронных токов, протекающих в области солитона.

Также установлено, что интегрально по времени взаимодействия солитона с плазмой суммарный ток всех зарядов, проходящий через любое поперечное сечение в лабораторной системе координат, равен нулю. Следовательно, квазинейтральность объема плазмы сохраняется после прохождения через нее ионно-звукового солитона.

### *Список литературы*

1. Кузнецов С.В. // Вестник Объединенного института высоких температур 2024. Т. 11, в печати.

И.И. ФАЙРУШИН, А.В. МОКШИН

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

## **САМОСОГЛАСОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ КОЛЛЕКТИВНОЙ ДИНАМИКИ ИОНОВ В НЕИДЕАЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ ЮКАВЫ**

В работе на основе самосогласованной релаксационной теории разработано описание поперечной коллективной динамики ионов в классической сильно неидеальной плазмы Юкавы. Ключевой характеристикой, описывающей поперечные коллективные возбуждения в многочастичной системе, является спектральная плотность поперечного потока. В настоящей работе данная величина рассчитывается теоретически и вычисляется из данных моделирования молекулярной динамики плазмы Юкавы при параметрах неидеальности и экранировки соответствующим состояниям близким к линии плавления. Теоретические расчеты дают результаты, согласующиеся с данными компьютерного моделирования.

I.I. FAIRUSHIN, A.V. MOKSHIN

*Kazan (Volga region) federal university, Kazan, Russia*

## **SELF-CONSISTENT RELAXATION THEORY OF THE TRANSVERSE ION COLLECTIVE DYNAMICS IN NON-IDEAL YUKAWA PLASMA**

In this work, based on the self-consistent relaxation theory, a description of the transverse collective dynamics in the classical strongly non-ideal Yukawa plasma is developed. The key characteristic describing transverse collective excitations in a many-particle system is the spectrum of the time correlation function of the transverse current. In this work, this value is calculated theoretically and calculated from the data of the molecular dynamics simulation of the Yukawa plasma with nonideality and screening parameters corresponding to states close to the melting line. Theoretical calculations give results consistent with computer simulation data.

Сильно неидеальная плазма Юкавы является моделью, которая широко используется для описания различных физических объектов: от пылевой плазмы до плазмы в устройствах по инерциальному термоядерному синтезу. Большое значение имеет модель Юкава плазмы и для фундаментальной теории жидкого состояния вещества, поскольку межчастичное взаимодействие в этом случае описывается простым аналитическим выражением. Ключевыми параметрами сильно неидеальной плазмы являются параметры неидеальности и экранировки. Данные характеристики определяют термодинамическое состояние системы. В последнее время наблюдается значительный интерес к вязкоупругому поведению Юкава системы, обусловленное тем, что на микроскопических пространственных масштабах в коллективной динамике ионов неидеальной плазмы могут проявляться поперечные колебательные процессы, которые являются типичными для твердых тел [1, 2]. В этом случае проявляющаяся микроскопическая сдвиговая жесткость обусловлена действием эффективных сил притяжения во взаимодействии между частицами. При этом пространственный масштаб, на котором проявляется квазижесткость, должен определяться размером области действия этих сил. В настоящей работе развивается подход к описанию поперечных коллективных возбуждений и сдвиговой жесткости на основе самосогласованной релаксационной теории [3-5]. В рамках данного подхода получены аналитические выражения для спектральной плотности поперечного потока и дисперсии поперечных коллективных возбуждений в неидеальной плазме Юкавы. Результаты теоретических расчетов согласуются с данными моделирования методом молекулярной динамики.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

### *Список литературы*

1. Mithen J. P. // *Phys. Rev. E* 2014. Vol. 89, 013101.
2. Yu N., Huang D., Lu S., Khrapak S. and Feng Y. // *Phys. Rev. E* 2024 Vol. 109, 035202.
3. Mokshin A.V., Fairushin I.I., Tkachenko I.M. // *Phys. Rev. E* 2022. Vol. 105, 025204.
4. Fairushin I.I., Mokshin A.V. // *Phys. Rev. E* 2023. Vol. 108, 015206.
5. Мокшин А.В., Хуснутдинов Р. М., Вильф Я. З., Галимзянов Б. Н. // *ТМФ* 2021. Т. 206, 245.



А.Ю. ШЕМАХИН

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

## СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНОГО ВЧ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана математическая модель, которая включает в себя уравнение Больцмана для несущего газа, уравнения сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты электромагнитного поля, введена функция распределения электронов по энергиям, зависящая от напряженности электрического поля. Получены результаты расчетов концентрации заряженных частиц и потенциала электрического поля.

A. YU. SHEMAKHIN

*Kazan Federal University, Kazan, Russia*

## END-TO-END MODEL AND CALCULATION OF PARAMETERS OF A JET RF DISCHARGE OF INTERMEDIATE PRESSURE

To study the parameters of a reduced-pressure RF plasma, a mathematical model has been developed that includes the Boltzmann equation for the carrier gas, the energy conservation equations, the continuity of electrons, ions and metastable atoms, Poisson, telegraphic equations for the RF components of the electromagnetic field, and the electron energy distribution function depending on the electric field strength. The results of calculations of the concentration of charged particles and the electric field potential are obtained.

Высокочастотная (ВЧ) плазма пониженного давления (13.3-133 Па) применяется для модификации материалов различной физической природы: сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др. [1]. Образованная данным видом разряда плазма, характеризуется следующими параметрами: концентрация электронов  $10^{15}$ – $10^{19}$  м<sup>-3</sup>, степень ионизации  $10^{-5}$ - $10^{-4}$ , электронная температура 1-4 эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке 3000-4000 К, в струе 320-1000 К.

ВЧ-плазма пониженного давления имеет ряд особенностей. Экспериментальные результаты [1] показали, что в плазменной струе велико влияние и индуктивной и емкостной составляющей, потому что плотность электронов в плазменной струе на несколько порядков выше чем в околоструйном пространстве, при этом обнаружены как аксиальная, так и азимутальная компоненты напряженностей магнитного поля и тока в плазме в вакуумной камере. Для исследования параметров ВЧ-плазмы пониженного давления разработана математическая модель, которая включает в себя уравнение Больцмана для несущего газа, уравнения сохранения энергии, неразрывности электронов, ионов и метастабильных атомов, Пуассона, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты электромагнитного поля, введена функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), зависящая от напряженности электрического поля. Для решения системы задач разработан гибридный численный метод, который включает в себя модифицированный метод Г.Бёрда для несущего газа и метод конечных объемов для расчета распределений электронной температуры и концентрации, преобразованных уравнений Максвелла. Для реализации метода разработана программа на языке C++, использующая библиотеки пакета OpenFOAM [2]. Коэффициенты диффузии электронов, частоты соударений, частоты ионизации, электронной теплопроводности рассчитываются по ФРЭЭ и сравниваются с расчетами по пакету BOLSIG+ [3-5].

Расчеты проведены для потока ВЧ-плазмы аргона с учетом немаксвелловской ФРЭЭ. ВЧ-плазма генерируется в разрядной камере радиусом входного отверстия 12 мм. Разрядная камера соединяется с вакуумной камерой, где образуется струя ВЧ-плазмы. Получены результаты расчетов концентрации заряженных частиц, скорости, давления и температуры плазмообразующего газа, напряженностей электрического и магнитного полей в разрядной и вакуумной камерах. Проведен анализ полученных результатов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

### *Список литературы*

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях: Теория и практика применения. – , 2000. Казань: Изд-во Казан. Ун-та
2. Пакет OpenFOAM. Режим доступа: <https://openfoam.org/>
3. Boeuf J. P. and Pitchford L.C. Two-dimensional model of a capacitively coupled RF discharge and comparisons with experiments in the Gaseous Electronics Conference reference reactor. Phys. Rev. E, 1995. – Vol. 51, No.2. 1376–1390.
4. G.J.M. Hagelaar and L.C. Pitchford. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. Plasma Sources Sci. Technol., 2005. – Vol. 14, 722–733.
5. UBC database, Database of scattering cross sections. Режим доступа: [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on November 12, 2019

А.И.ХИРЬЯНОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ, Д. В. ТОЛБУХИН  
*Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В СИСТЕМЕ С ОДНОРАКУРСНОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ**

Предлагаются два алгоритма послойной локализации трехмерной неоднородной плазменной структуры в пространстве на основе однокурсной интерферометрии и тенеграммы в предположении послойной осесимметричности структуры, использующих информацию о качественных и количественных дифракционных эффектах лазерного излучения с длиной волны 0,5-1 мкм на объектах с характерными размерами 10-100 мкм. Приводятся теоретические предпосылки к разработке алгоритмов, результаты применения к эксперименту, сопоставление точности результатов.

A.I. KHIRIANOVA, E.V. PARKEVICH, D.V. TOLBUKHIN  
*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **USE OF DIFFRACTION EFFECTS ACCOMPANY TRANSMISSION OF PROBING LASER RADIATION TO RESTORATE THREE-DIMENSIONAL PLASMA STRUCTURE IN A SYSTEM WITH SINGLE-ANGLE REGISTRATION**

Two algorithms are proposed for layer-by-layer localization of a three-dimensional inhomogeneous plasma structure in space based on single-angle interferometry and a shadowgram under the assumption of layer-by-layer axisymmetric structure, using information about the qualitative and quantitative diffraction effects of laser radiation with a wavelength of 0.5-1  $\mu\text{m}$  on objects with characteristic sizes of 10-100  $\mu\text{m}$ . The theoretical background for the development of algorithms, the results of application to experiment, and a comparison of the accuracy of the results are given.

Неоднородные плазменные микроструктуры, быстро развивающиеся во времени, являются сложной задачей для диагностики, особенно с точки зрения многокурсовой синхронной регистрации. Кроме того, так как предварительная фокусировка на плазменной структуре невозможна из-за скорости её развития. Фокусировка регистрирующей оптики, атким образом, происходит относительно электрода, имеющего характерные масштабы десятков микрон. Структура разряда с диаметром 10-100 мкм может существенно отклоняться от плоскости фокусировки, что приводит к фиксации сложных дифракционных эффектов на объекте.

Используя предположение об осесимметричности разряда, приводится два различных алгоритма локализации каждого осесимметричного слоя объекта с характерным диаметром 10-100 мкм в пространстве с точностью до нескольких микрон. Отправной точкой для каждого из алгоритмов является дифракционный след, оставленный прошедшим через слой излучением на тенеграмме и интерферограмме.

В первом алгоритме с помощью уравнения Гудмана распространения лучей в пространстве для каждого из срезов комплексной волны (интенсивность регистрируется тенеграммой, набег фазы — интерферограммой) восстанавливается картина распространения вдоль хода зондирующего излучения. Используя данные о существовании интенсивностной «перетяжки» - зоны невидимости - в выходной плоскости осесимметричного объекта, производится поиск наиболее вероятного положения объекта в пространстве.

Во втором алгоритме используются данные о малых дифракционных изменениях в профиле набега фазы для исследуемых масштабов объекта, длины волны и возможной дефокусировки, производится расчёт профиля плотности среза методом Рытова. Затем с помощью уравнения Гудмана восстанавливается картина распространения вдоль хода зондирующего излучения и производится поиск положения среза, реализующего максимально близкий дифракционный след в плоскости регистрации к экспериментальному.

Через полученные трехмерные структуры моделируется прохождение зондирующего излучения, параметры прошедшей через объект волны сравниваются с зарегистрированными в эксперименте. Алгоритмы показывают свою состоятельность, высокую точность в имеющихся предположениях, являются принципиально новыми и актуальными для регистрации быстроразвивающихся мелкомасштабных неоднородных структур.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант No 19-79-30086)

### *Список литературы*

1. A. Gonsalves, T. Rowlands-Rees, B. Broks, J. Van der Mullen, and S. Hooker, Transverse interferometry of a hydrogen-filled capillary discharge waveguide, *Physical review letters* 98, 025002 (2007).
2. S. M. Rytov, Y. A. Kravtsov, and V. I. Tatarskii, *Introduction to statistical radiophysics* (1978).
3. A. Khirianova, E. Parkevich, M. Medvedev, K. Smaznova, T. Khirianov, E. Varaksina, and A. Selyukov, Extraction of high-contrast diffraction patterns of fine-structured electrical sparks from laser shadowgrams, *Optics Express* 29, 14941 (2021).
4. E. Parkevich and A. Khirianova, Simulation of laser diffraction by micron-sized plasma filaments, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 49, 312 (2022).

УЛАСЕВИЧ Д.Л.<sup>1,2</sup>, ХАЙРУТДИНОВ Р.Р.<sup>1</sup>, АНДРЕЕВ В.Ф.<sup>1</sup> АСАДУЛИН Г.М.<sup>1</sup>, СЕРГЕЕВ Д.С.<sup>1</sup>,  
РЫЖАКОВ Д.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД

В данной работе приводится описание метода восстановления магнитных поверхностей плазмы и нормированных профилей электронной плотности и температуры в плазме токамака Т-15МД и приводятся примеры расчета для избранных импульсов кампании 2023/24 года.

ULASEVICH D.L.<sup>1,2</sup>, KHAYRUTDINOV R.R.<sup>1</sup>, ANDREEV V.F.<sup>1</sup> ASADULIN G.M.<sup>1</sup>, SERGEEV  
D.S.<sup>1</sup>, RYZHAKOV D.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## RECONSTRUCTION OF MAGNETIC SURFACES IN THE PLASMA OF TOKAMAK T-15MD

This paper describes a method for reconstructing plasma magnetic surfaces and normalized electron density and temperature profiles in the plasma of the T15-MD tokamak and provides computational examples for selected 2023/24 campaign pulses.

Восстановление границы плазмы – необходимый шаг при изучении внутренних процессов в плазме и определении различных параметров плазмы. Целью работы было продемонстрировать алгоритм восстановления магнитных поверхностей в плазме токамака Т-15МД по имеющимся магнитным диагностикам.

Выбранный метод восстановления плазменного равновесия применим в случае, когда в заданный момент времени из экспериментальных данных известны величины токов в плазме и катушках полоидального магнитного поля, суммарный ток по камере, а также потоки в магнитных петлях. Для восстановления профиля тока плазмы используется метод подвижных токовых филаментов.

Метод филаментов [2] – замена плазменного шнура набором из  $K$  виртуальных токовых колец с токами  $I_k$ , так что выполняется условие  $I_{pl} = \sum^K I_k$ . Поток плазмы представлен в виде  $\Psi_{pl}(r, z) = \sum^K I_k G(r_k, z_k, r, z)$ , где  $G$  – функция Грина. Аналогично представляется поток  $\Psi_{ext}$  от  $N$  полоидальных катушек и  $H$  пассивных элементов камеры. Тогда суммарный магнитный поток имеет вид  $\Psi_{sum} = \Psi_{pl} + \Psi_{ext}$ . При этом ток по  $H$  пассивным элементам камеры, представленных набором аксиально-симметричных элементов, вычисляется при помощи 5-ти моментного разложения Фурье [3].

Отличие используемого в данной работе метода от классического метода филаментов, описанного выше, заключается в итеративном смещении позиции филаментов так, что филаменты всегда расположены вокруг магнитной оси восстановленной плазмы, что значительно повышает точность восстановления.

Был создан алгоритм отображения измеренных профилей  $T_e$  и  $n_e$  на восстановленную сетку магнитных поверхностей. Для восстановления нормированных профилей использовались диагностики Томпсона рассеяния и СВЧ-интерферометр. СВЧ-интерферометр позволяет измерять величину  $\int n_e dz$  вдоль хорды  $R=150$  см вертикально, а диагностика Томпсона рассеяния дает 10 локальных точек измерения на оси  $z=0$  с величинами  $T_e$  и  $n_{e1}$ , после чего величина  $n_{e1}$  нормировалась по данным СВЧ-интерферометра.

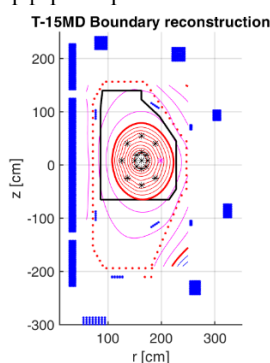


Рисунок 1 Пример восстановления равновесия в плазме Т15-МД, #845 (350 мс)

В работе продемонстрированы результаты восстановления равновесия для избранных импульсов зимней кампании 2023/24 года. Показано хорошее согласие между восстановленной границей плазмы и данными видеокamеры в режимах с СВЧ-нагревом плазмы (ток плазмы > 50 кА). Показано, что восстановление границы плазмы затруднено в случаях, если ток по камере превышает ток, текущий по плазме. Кроме того, была протестирована программа FV в пультовой Т15-МД, позволяющая производить восстановление равновесия сразу после импульса в автоматическом режиме.

Список литературы

1. Khvostenko, P. P., et al. // Physics of Atomic Nuclei 83 (2020): 1037-1057
2. Lao L.L. et al. // Nucl. Fusion 25 (1985) 1611
3. M.Sugihara, V.Lukash et al. // 30th EPS Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, St-Petersburg, July 2003

А.И. САЙФУТДИНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ КОРОТКОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В работе сформулирована самосогласованная модель СВЧ-разрядов в молекулярных и атомарных газах. Численные расчеты проведены для разрядов в азоте с примесью кислорода и в чистом гелии при средних и высоких давлениях. Продемонстрирована динамика вытягивания СВЧ-плазматидов, формирования их диффузной формы и переход в филаментированную. Исследовано влияние эффекта быстрого нагрева на динамику СВЧ-разряда в азоте. Результаты численных расчетов сопоставлены с известными экспериментальными данными.

A.I. SAIFUTDINOV

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

## INVESTIGATION OF NEGATIVE GLOW PLASMA PARAMETERS OF A SHORT GLOW DISCHARGE FOR ANALYTICAL AND PLASMOCHEMICAL APPLICATIONS

The work formulates a self-consistent model of microwave discharges in molecular and atomic gases. Numerical calculations were carried out for discharges in nitrogen with an admixture of oxygen and in pure helium at medium and high pressures. The dynamics of elongation of microwave plasmoids, formation of their diffuse form and transition to filamentation have been demonstrated. The influence of the rapid heating effect on the dynamics of a microwave discharge in nitrogen has been studied. The results of numerical calculations are compared with known experimental data.

В работе представлены результаты исследований параметров плазмы и кинетики быстрых электронов в области отрицательного свечения (ОС) короткого тлеющего разряда при низких давлениях и разряда с микрополым катодом при высоких давлениях на основе гибридной модели [1,2], включающей кинетическое описание электронов и гидродинамическое описание тяжелой компоненты плазмы.

Результаты численных расчетов сопоставлены с результатами зондовых исследований. Показано, что гибридная модель хорошо описывает параметры плазмы в области ОС тлеющего разряда: температуру и концентрацию электронов. Кроме того, гибридная модель позволяет достаточно точно описать формирование пиков на ФРЭЭ от быстрых электронов, рожденных в результате реакций пеннинговской ионизации и ударов второго рода. Продемонстрирована возможность регистрации примесей углеводородов: метана, этанола, кремний содержащих газов – силана и др., а также продуктов их конверсии.

Показана надежность в определении концентрации возбужденных атомов гелия в плазме отрицательного свечения путем анализа экспериментальной высокоэнергетической части ФРЭЭ, а именно пиков от быстрых электронов, рожденных в реакциях пеннинговской ионизации между двумя метастабильными атомами гелия и пеннинговской ионизации примесных атомов и молекул малой концентрации.

Вышеизложенная методика может быть успешно применена для определения абсолютных значений концентрации примесных атомов и молекул путем исключения второй производной ионного тока на зонд и анализе высокоэнергетической части ФРЭЭ. Такая методика может быть востребована как в газоаналитических приложениях, так и приложениях, связанных с синтезом различных типов наноструктур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-20091, <https://rscf.ru/project/24-22-20091/>.

### Список литературы

1. Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Physics Reports. 2023. Vol. 49 P.772–785
2. Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Sources Science and Technology. 2023. Vol 32. P. 114001
3. Zhou C. et al. //Plasma Sources Science and Technology. 2022. Vol. 31. P. 107001
4. Zhou C. et al. //Plasma Sources Science and Technology. 2021. Vol. 30. P.117001
5. Saifutdinov A. I., Sysoev S. S //Plasma Sources Science and Technology. 2021. Vol. 30. P. 017001

А.В. ДЕДУРА<sup>1</sup>, Д.С. ЛЕОНТЬЕВ<sup>1</sup>, В.С. ЛИСИЦА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПЕКТРА ВОДОРОДА В MSE-ДИАГНОСТИКЕ

В рамках теоретических исследований спектра водорода для MSE диагностики получены отношения интенсивностей различных штарковских компонент линии H $\alpha$ . Определены зависимости поляризационной характеристики спектра от плотности плазмы и от угла между линией наблюдения и индуцированным электрическим полем.

A.V. DEMURA<sup>1</sup>, D.S. LEONTYEV<sup>1</sup>, V.S. LISITSA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## POLARIZATION CHARACTERISTIC OF HYDROGEN SPECTRA IN MSE-DIAGNOSTIC

As part of theoretical studies of the hydrogen spectrum for MSE diagnostics, the intensity ratios of various Stark components of the H $\alpha$  line were obtained. The dependences of the polarization characteristics of the spectrum on the plasma density and on the angle between the line of observation and the induced electric field are determined.

Электродинамический эффект Штарка (Motional Stark Effect – MSE) – это эффект, наблюдаемый при воздействии лоренцовского электрического поля, возникающего в лабораторной системе координат атомов водорода, пролетающих сквозь магнитное поле. Вектор этого поля определяется как  $\mathbf{F}=[\mathbf{v}\mathbf{B}]$ , где  $\mathbf{F}$  – вектор лоренцевского поля,  $\mathbf{v}$  – вектор скорости атома,  $\mathbf{B}$  – вектор индукции магнитного поля. При этом спектр водорода в случае плазмы с относительно малой плотностью состоит из хорошо различимых поляризованных компонент:  $\pi$ -компонент с вектором поляризации, параллельным  $\mathbf{F}$  и  $\sigma$ -компонент, с вектором поляризации, лежащим в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{F}$  [1-2]. Эти компоненты отстоят друг от друга на расстояние, пропорциональное величине электродинамического электрического поля. Интенсивность штарковской компоненты линии H $\alpha$  пропорциональна вероятности радиационного распада  $3j-2i$ , энергии между уровнями и населённость верхнего состояния, деленного на его стат. вес [3]. Для нахождения населенностей всех состояний водорода с главными квантовыми числами в диапазоне  $n=1-6$  была построена кинетическая модель, включающая возбуждение и ионизацию при столкновении с протонами плазмы, девозбуждение, радиационный распад состояний. Скорости радиационных распадов рассчитывались по формулам Гордона [3]. Для сечений возбуждения уровней  $n=1-5$  использовались сечения, рассчитанные в борновском приближении в базе параболических волновых функций. При этом для корректного описания медленных столкновений был введен адиабатический фактор [4], учитывающий сильную попарную связь между основным и возбужденным состояниями. Для сечений ионизации были выбраны аппроксимационные формулы [6]. Для сечений возбуждения на уровни с  $n=6$  также использовались аппроксимационные полные сечения возбуждения из [6], поскольку на населенности уровней с  $n=3$  кинетика заселения верхних уровней с  $n>5$  оказывает малое влияние.

Для исследования поляризационной характеристики положим, что линия наблюдения перпендикулярна скорости пучка. Тогда вектор колебаний электрического поля ЭМВ излучения составляет угол  $(\pi/2-\theta)$  с направлением электрического поля, где угол  $\theta$  – это угол между линией наблюдения и направлением электрического поля. Вектор колебаний  $\pi$  компонент дает вклад в интенсивность излучения в плоскости, перпендикулярной скорости,  $I_{\pi} \sin^2 \theta$ , а вектор колебаний  $\sigma$  компонент в этой же плоскости  $-I_{\sigma} \cos^2 \theta$  ( $I_{\sigma}$  – половина суммарной интенсивности  $\sigma$  компонент,  $I_{\pi}$  – суммарная интенсивность  $\pi$ ). Кроме того,  $\sigma$  компоненты дают вклад в поляризацию ЭМВ, направленную вдоль скорости с интенсивностью равной  $I_{\sigma}$ . Тогда степень поляризации излучения относительно скорости  $P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} = \frac{[I_{\pi} - I_{\sigma}] \cdot \sin^2 \theta}{I_{\pi} \sin^2 \theta + I_{\sigma} (\cos^2 \theta + 1)}$ . В пределе больших плотностей при отсутствии ионизации степень поляризации стремится к нулю при любом угле  $\theta$ , так как  $I_{\pi} = I_{\sigma}$ . Учет ионизации нарушает это соотношение и тогда даже при больших плотностях плазмы  $P$  отлична от нуля.

### Список литературы

1. Крупин В.А. и др.// РАЗРАБОТКА MSE ДИАГНОСТИКИ ПРОФИЛЯ ТОКА ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-10, Препринт ИАЭ- 5940/7, Москва: РИЦ “Курчатовский институт,” 1995. 33 с.
2. Ralchenko Yu. et al//A non-statistical atomic model for beam emission and motional Stark effect diagnostics in fusion plasmas, Review Scientific Instruments 2012, vol. 83, 10D504.
3. Бете Г., Солитер Э./Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами, Москва: ГИФМЛ, 1960.
4. Собельман И.И. // Введение в теорию атомных спектров. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 642 с.,1963.
5. Janev R.K. et al // Collision Processes in Low-Temperature Hydrogen Plasmas, Berichte des Forschungszentrums Jülich, published by Forschungszentrum. Zentralbibliothek, 2003.

А.Б. ЛЯШЕНКО<sup>1</sup>, А.А. СТЕПАНЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННЫХ ФИЛАМЕНТОВ С УЧЁТОМ НЕОДНОРОДНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Проведено комплексное моделирование транспорта плазменных филаментов на периферии токамака Т-15МД, включая исследование влияния неоднородности полоидальных профилей плазмы на динамику филаментов в разных режимах работы установки. Были получены значения скоростей движения филаментов и связанных с ними аномальных потоков частиц и тепла в зависимости от полоидальных профилей плазмы, геометрических параметров филаментов и режимов работы установки.

A. LYASHENKO, A. STEPANENKO

<sup>1</sup> *National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## STUDY OF PLASMA FILAMENTS DYNAMICS CONSIDERING INHOMOGENEOUS PLASMA PROFILES

The comprehensive simulations of plasma filament transport at the edge of the T-15MD tokamak, incorporating the study of the influence of poloidal inhomogeneity of plasma profiles on the dynamics of these filaments, have been conducted across various operating regimes of the facility. The velocities of filaments and associated anomalous fluxes of particles and heat are obtained depending on the variations of poloidal plasma profiles, geometrical parameters of the filaments and working regimes of the facility.

Большие потоки тепла и частиц на материалы первой стенки, связанные с аномальным переносом плазмы, являются одним из основных препятствий на пути реализации реактора на основе управляемого термоядерного синтеза [1]. Данные экспериментов показывают, что до половины общего потока тепла и частиц связаны с формированием в области сепаратрисы филаментов, когерентных структур вытянутых вдоль линий магнитного поля, также называемых блобами [2]. Перенос частиц и тепла в область скреп-слоя, связанный с филаментами, носит конвективный характер и определяется механизмами замыкания тока в плазме, которые, в свою очередь, определяются геометрией филамента [3].

В работе исследуется движение отдельных плазменных филаментов. Моделирование проведено в рамках электромагнитного приближения с учётом рассчитанных параметров установки в пристеночной плазме токамака Т-15МД. Исследовано влияние комбинации факторов на динамику движения филаментов: геометрии блоба, формы полоидального профиля температуры и концентрации, а также режима работы установки. Вычислены суммарные потоки тепла и частиц, переносимые филаментами при их движении через сепаратрису, а также определены скорости движения филаментов в зависимости от комбинации указанных выше факторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект государственного задания № FSWU-2023-0031.

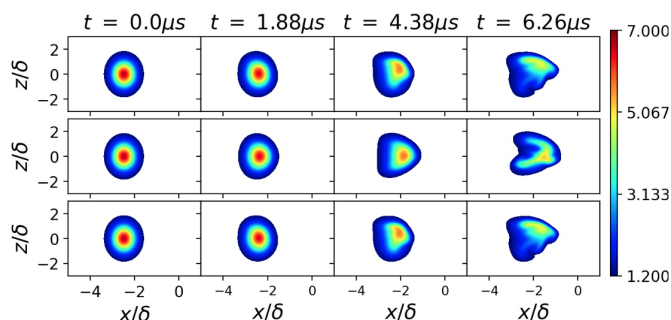


Рис. 1. Динамика филамента с однородной по длине структурой. Мощность разряда 10 МВт, поперечный размер блоба  $\delta = 0.5$  см. Изображено поперечное сечение филамента на концах силовых линий магнитного поля (верхний и нижний ряды изображений) и в центральном разрезе (средний ряд).

### Список литературы

1. Hidalgo C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1995. V. 37. №. 11A. P. A53.
2. Boedo J.A. et al. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. No. 11. PP. 4826-4833.
3. Krashennnikov S. I. // Phys. Lett. A. 2001. V. 283. No. 5-6. PP. 368-370.

Д.Л. КИРКО, Б.Ю. БОГДАНОВИЧ, А.С. САВЕЛОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ИЗУЧЕНИЕ МИКРООБРАЗОВАНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ РАЗРЯДЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Исследовалось влияние магнитного поля на рост микрообразований на поверхности катодов из титана, нержавеющей стали и меди при разряде в электролите. Регистрировались микрообразования в виде волокон, торов и хлопьев.

D.L. KIRKO, B.Yu. BOGDANOVICH, A.S. SAVJOLOV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **RESEARCH OF MICROFORMATIONS ON THE SURFACE OF ELECTRODES AT ELECTROLYTE DISCHARGE IN MAGNETIC FIELD**

The influence of magnetic field at the grown of microformations on cathodes surface from titan, stainless steel and copper at electrolyte discharge was investigated. Microformations in a form of fibrous, torus, and flakes were registered.

Разряды над поверхностью воды и электролитов используются в качестве способов очистки жидкостей, и изучения методов модификации поверхностей материалов [1,2]. В некоторых схемах один из электродов располагается над поверхностью жидкости. В данной работе разряд в электролите формировался между двумя электродами, помещенными в объем данной жидкости. Электролит содержал раствор карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) в дистиллированной воде. Характерный диапазон токов разряда составлял 0.1-0.4 А, при напряжениях на электродах 0-250 В, и частоте следования импульсов напряжения: 50, 100 Гц. Область свечения разряда располагалась вблизи катода, помещенного в керамический изолятор. Для катодов использовались проволоки из вольфрама, титана, нержавеющей стали и меди диаметром 0.5-2 мм. Исследовались поверхности катодов после воздействия разряда в течении 5-20 мин.

Ранее было обнаружено, что на появление поверхностных микрообразований на поверхности электродов оказывает влияние магнитное поле. Ввиду этого проводилось сравнение поверхностей электродов в обычном разряде и при наличии постоянного магнитного поля в диапазоне  $B=100-800$  Гс. В данных экспериментах в качестве катода устанавливались электроды их меди, нержавеющей стали и титана. Форма острия катодов обычно изготовлялась в виде конуса или немного стачивались на плоскость две грани. В случае медных катодов происходило возникновение пористых образований на местах близких граням поверхностей. Расположение данных пор, как правило, имело нерегулярный характер с размерами отверстий 0.1-2 мкм. Вместе с тем, наблюдалось появление структур похожих на “волокна” или “пух”, с размерами отдельных хлопьев около 5-20 мкм. В присутствии магнитного поля возникали образования по форме напоминающие “торы” с размерами 0.2-5 мкм. Состав всех данных образований обычно содержал распыленный материал катода и элемент, содержащийся в растворе – натрий.

В магнитном поле при катодах из нержавеющей стали происходило появление волокон диаметром 1-5 мкм, которые укладывались в волнистые формы или подобие “торов”. Для титановых катодов достаточно типичным является возникновение микросфер с размерами 0.5-30 мкм и пористых поверхностей с диаметром отверстий около 0.1-5 мкм. В настоящих опытах в магнитном поле также возникали тонкие слоистые образования похожие на “лепестки” с размерами 1-10 мкм. При экспериментах в присутствии магнитного поля в объеме электролита для всех электродов регистрировались зависимости возникновения поверхностных микрообразований от величины магнитного поля. В большинстве случаев магнитное поле приводило к усилению роста микрообразований, а также появлению новых форм данных образований.

### *Список литературы*

1. Канарев Ф.М. Низкоамперный электролиз воды. Краснодар: Изд-во Краснодарск. ун-та, 2010. 81 с.
2. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Ефимов А.В., Гильмутдинов А.Х., Кашапов Н.Ф. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 3. С. 472.
3. Кирко Д.Л. // Физика плазмы. 2020. Т. 46, № 6, С. 496.

И.Г. ГРИГОРЬЕВА<sup>1</sup>, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА

Комплексные измерения спектров импульсного рентгеновского излучения плазмы микропинчового разряда на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» показали зависимость от параметров и конструкции установки. Проведенные исследования спектральных характеристик позволили получить экспериментальные результаты о параметрах плазмы и протекающих в ней физических процессов в зависимости от материалов и конструкции разрядных электродов установки. Определить влияния на спектр рентгеновского излучения разрядного тока. Определить ускорительные механизмы образования жесткой компоненты рентгеновского излучения.

I.G. GRIGORYEVA<sup>1</sup>, G.Kh. SALAKHUTDINOV<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FEATURES OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF X-RAY RADIATION OF MICROPINCHIAL DISCHARGE PLASMA

Complex measurements of the spectra of pulsed X-ray radiation of micropinchial discharge plasma at a low-inductive vacuum spark type installation showed dependence on the parameters and design of the installation. The conducted studies of the spectral characteristics allowed us to obtain experimental results on the parameters of the plasma and the physical processes occurring in it, depending on the materials and design of the discharge electrodes of the installation. To determine the effects of discharge current on the X-ray spectrum. To determine the accelerating mechanisms of the formation of a rigid component of X-ray radiation.

Экспериментальные исследования проводились на установки типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НИЯУ МИФИ) [1]. Разряд осуществлялся в вакуумной камере, откачанной до вакуума не хуже  $10^{-4}$  Торр. Рабочая среда разряда – продукты эрозии материала электродов (железо). Ток разряда 150 кА.

Для измерения спектра высокоинтенсивного, импульсного рентгеновского излучения из исследуемых областей плазмы был разработан и создан комплекс рентгеновских спектрометров на основе сцинтилляционных и термолюминесцентных спектрометров фторида лития LiF(Mg,Ti) [2,3]. Применение детекторов LiF(Mg,Ti) позволяет проводить измерения интегрального рентгеновского излучения в диапазоне от 500 эВ до 1000 кэВ.

Конструктивно термолюминесцентные детекторы выполняются в виде диска с размерами порядка  $\varnothing$  5 мм и высотой 0,9 мм. Термолюминесцентные детекторы LiF(Mg,Ti) не чувствительны к электромагнитным наводкам, практически не чувствительны к ультрафиолетовому излучению, не имеют мертвого поверхностного слоя, имеют линейный отклик в широком динамическом диапазоне поглощенной дозы излучения (от 20 мЗв до 10 Зв) [3].

В ходе экспериментов зарегистрированы интегральные по времени спектры рентгеновского излучения однократных сильноточных разрядов в режиме микропинчевания связанные с физическими процессами, происходящими в плазме разряда. Различные участки спектра отвечают разным стадиям микропинчового разряда. Исследования спектров рентгеновского излучения плазмы в зависимости от конфигурации и конструкции электродов разрядной системы показали, что спектр зависит от области локализации разряда и концентрации частиц, участвующих в процессе пинчевания.

Плазма импульсного сильноточного электрического разряда формируется из продуктов эрозии анода, соответственно, на параметры образованной плазмы влияет материал, из которого изготовлены электроды разрядной системы. Исследование спектров рентгеновского излучения плазмы, получаемой с анодом из различных материалов, показали зависимость вида спектра от атомного номера  $Z$  материала анода. Эксперименты показали, что с ростом атомного номера  $Z$  материала анода разрядной системы растет электронная температура плазмы  $T_e$ . Вклад в рентгеновское излучение в области энергии  $h\nu > 80$  кэВ возникновение рентгеновских квантов определяется развитием ускорительных процессов и зависит от электронной температуры  $T_e$  микропинча. Чем выше электронная температура  $T_e$  микропинча, тем выше интенсивность жесткого рентгеновского излучения, образованного в результате ускорительных процессов. Все результаты не противоречат представлениям в рамках модели радиационного сжатия z-пинча [4].

### Список литературы

1. Григорьева И.Г., Костюшин В.А., Салахутдинов Г.Х. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7, №2. С.107.
2. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. Спектрометрия импульсного рентгеновского излучения плазмы сильноточного электрического разряда. // ПТЭ. 2015. № 2. С. 89-94.
3. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2015. № 1. С. 100.
4. Вихрев В.В., Иванов В.В., Кошелев К.Н. // Физика плазмы. 1982. Т. 8. Вып. 6. С. 1211.



Л.В. ФУРОВ, А.С. ПОСАНЧУКОВА, О.И. ТАРАСОВА

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Россия*

## ПЛАЗМЕННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ КАК ИСТОЧНИК ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО УДАРА

Исследовано воздействие плазменного образования, полученное в результате испарения проводящей фольги при электрическом взрыве, на материалы. Контакт плазменного образования с материалом приводит к кратковременному воздействию на него (тепловому удару). Результат этого воздействия проявляется в различной степени оплавления, отслоения или разрушения материала. В зависимости от подводимой энергии, испытываемого материала (текстолит, стекло, ситалл и др.) степень воздействия различна. Приведены результаты проведённых экспериментов в свободной атмосфере.

L.V. FUROV, A.S. POSANCHUKOVA, O.I. TARASOVA

*Vladimir State University, Russia*

## PLASMA FORMATION AS A SOURCE HIGH ENERGI HEAT SHOCK

The effect of plasma formation resulting from the evaporation of conductive foil during an electrical explosion on materials was studied. Contact of the plasma formation with the material leads to a short-term effect on it (thermal shock). The result of this impact is manifested in varying degrees of melting, peeling or destruction of the material. Depending on the supplied energy and the material being tested (textolite, glass, ceramic glass, etc.) the degree of impact is different. The results of experiments performed in a free atmosphere are presented.

При электрическом взрыве проводящей конденсаторной фольги в форме круга диаметром 100 мм мощным импульсом тока (сила тока до 15 кА, длительность электрического импульса  $\approx 70$  ms, подводимая электроэнергия до 50 кДж) в свободной атмосфере формировались плазменные образования. В качестве источника тока использовался индуктивный накопитель электрической энергии [1]. Как известно, технология машиностроения широко использует плазменные и лазерные способы обработки материалов. Это упрочнение поверхности деталей при изменении структуры поверхностного слоя. Однако рабочая среда плазмотронов не позволяет проводить испытания материалов на тепловой удар.

В настоящей работе предлагается использование плазменных образований для решения задач как термической обработки, так и испытания на тепловой удар металлических и неметаллических материалов. Большая запасаемая электромагнитная энергия (до 10 кДж) при достаточном воздействии на поверхность до 100 ms, высокая яркостная температура  $\approx 4500$  К позволяют определить круг технологических процессов, где плазменные образования имеют преимущества перед плазмотронами.

Плазменное образование получается следующим образом: при использовании рабочего тела в виде круговой диафрагмы (диска), составленной из 7 слоёв проводящей фольги, толщина каждого слоя которой 8 мкм и подвода тока в её центр и по периферийной окружности плотность тока имеет максимум у центрального токоподвода. Применение кольцевого и центрального токоподводов позволило отказаться от применения закрытой камеры с отверстием, тем самым повысить температуру плазменного образования за счёт уменьшения контакта плазмы со стенками камеры и значительно упростить конструкцию плазменной пушки [2]. Это обеспечивает весьма мощный поток тепла от плазмы к поверхности и позволяет испытывать различные материалы на тепловой (термический) удар. Были проведены испытания стекла, ситалла, картона, фанеры, плексигласа, текстолита и других диэлектрических материалов. Эксперименты показали, что в зависимости от испытываемого материала степень воздействия различна. Площадь воздействия  $\approx 300$  см<sup>2</sup> и более. Толщина образца варьировалась от 3 до 10 мм. Возникающие тепловые градиенты на стадии нагрева и охлаждения также, в зависимости от условий эксперимента, приводят к оплавлению и частичному расслоению образца. Предлагаемый способ испытания стойкости диэлектрических материалов описан в [3, 4].

Экспериментально установлено, что разовое кратковременное воздействие плазменного образования приводит к структурному изменению поверхности образца. Критерием стойкости образца к тепловому удару служит степень оплавления, отслоения или его разрушение. Полученные результаты по испытанию диэлектрических материалов на кратковременный (менее 0.1 с) тепловой удар позволяют говорить о перспективности поверхностного кратковременного теплового воздействия (удара) на теплонагруженные диэлектрические материалы. Следует отметить, что этот способ также позволяет проводить испытания композитных материалов.

### *Список литературы*

1. Кунин В.Н., Конопасов Н.Г., Плешивцев В.С. // ПТЭ, 1988. №3, С.103-104.
2. Фуров Л.В. Устройство кумуляции плазменных сгустков // Патент на изобретение №2692689, 26.06.2019, Бюл. №18.
3. Фуров Л.В. Способ испытания стойкости диэлектрических материалов на тепловой удар // Патент на изобретение №2775995, 12.07.2022, Бюл. № 20.
4. Фуров Л.В. // Известия РАН, Серия Физическая, 2022, Том. 86, № 6. С. 882-885.

А. БАСАК<sup>1</sup>, А.С. ДРОЗД<sup>1,2</sup>, И.И. ПАШКОВ<sup>1</sup>, А.С. ПРИШВИЦЫН<sup>1</sup>, С.А. САПРОНОВ<sup>1</sup>, С.А. КРАТ<sup>1</sup>, Ю.М. ГАСПАРЯН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский Институт», Москва, Россия

## СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ НА ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0

В работе представлены описание и особенности СВЧ-интерферометра токамака МИФИСТ-0, используемого для измерения средней электронной концентрации, показаны результаты тестирования СВЧ-интерферометра и полученные экспериментальные данные. Сигнал промежуточной частоты образуется за счет свипирования частот (принцип FCWA), зондирование проводится в горизонтальном направлении, с отражением от внутренней стенки установки. Высокая чувствительность СВЧ-интерферометра позволяет получать надежные данные даже при малых концентрациях плазмы в токамаке.

A. BASAK<sup>1</sup>, A.S. DROZD<sup>1,2</sup>, I.I. PASHKOV<sup>1</sup>, A.S. PRISHVITSYN<sup>1</sup>, S.A. SAPRONOV<sup>1</sup>, S.A. KRAT<sup>1</sup>, Y.M. GASPARYAN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## MICROWAVE INTERFEROMETER FOR MEASURING THE AVERAGE ELECTRON CONCENTRATION ON THE MEPHIST-0 TOKAMAK

The paper presents a description and features of the microwave interferometer for the MEPhIST-0 tokamak, used to measure the average electron density, shows the results of testing the microwave interferometer and the experimental data obtained. The IF signal is generated with frequency sweeping (FCWA principle), probing is carried out in the horizontal direction, with reflection from the inner wall of the installation. The high sensitivity of the microwave interferometer makes it possible to obtain reliable data even at low plasma concentrations in the tokamak.

Институт ЛаПлаз НИЯУ МИФИ разрабатывает сферический токамак МИФИСТ-0 [1] для учебно-демонстрационных и исследовательских целей. Большой радиус установки  $R_0 = 25$  см, малый радиус  $a = 13$  см. На токамаке МИФИСТ-0 СВЧ-интерферометр используется для измерения среднего значения электронной концентрации плазмы. Рабочая длина волны СВЧ-интерферометра  $\lambda = 3,19$  мм. Зондирование осуществляется на обыкновенной волне в горизонтальном направлении в экваториальной плоскости токамака и с отражением от внутренней стенки. Дополнительный набег фазы при прохождении электромагнитной волны через плазму можно считать пропорциональным средней концентрации электронов [2]:

$$\Delta\varphi = -\lambda k \langle N_e \rangle L$$

где  $\Delta\varphi$  – дополнительный набег фазы,  $\lambda$  – длина волны,  $\langle N_e \rangle$  – средняя концентрация электронов,  $L$  – линейный размер плазмы вдоль направления зондирования,  $k = 2,82 \times 10^{15}$  [рад × м].

СВЧ-интерферометр токамака МИФИСТ-0 состоит из модуля ГУН (Генератор, Управляемый Напряжением), усилителя, умножителя частоты  $\times 13$  и смесителя. СВЧ-излучение вводится и принимается из вакуумной камеры через сверхразмерную лучеводную антенну. СВЧ-интерферометр работает по принципу FCWA (Frequency Modulated Continuous Wave) радара, со свипированием частоты. ГУН управляется пилообразным сигналом с генератора, а сигнал промежуточной частоты (ПЧ), получаемый на смесителе, регистрируется осциллографом Rigol-MSO5354.

Отличительными особенностями СВЧ-интерферометра являются:

1. Высокая чувствительность к плазме;
2. Компактная конструкция и простота в использовании;
3. Фазовая стабильность (кварцевый генератор);
4. При высоких электронных концентрациях плазмы может использоваться в качестве рефлектометра;
5. Малая чувствительность к вибрациям.

В работе представлено описание СВЧ-интерферометра токамака МИФИСТ-0, расчет возможности зондирования плазмы СВЧ-интерферометром в условиях рефракции. Проведены измерения плазмы, создающейся за счет пробоя с СВЧ-предионизацией от магнетрона с частотой 2,45 ГГц, линейная концентрация электронов при этом составляла  $\langle N_e \rangle L \sim 5 \times 10^{17}$  м<sup>2</sup>. Данные об электронной концентрации восстанавливаются постобработкой оцифрованных сигналов с преобразованием Гильберта.

### Список литературы

1. Krat S. and others. // Fusion Sci. and Tech. 2023. Vol. 79, №. 4. P. 446-464.
2. D. Veron // Opt. Commun. 1974. Vol.10, P. 95–98.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ШНУРА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ МИФИСТ-0 НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА

Университетский токамак МИФИСТ-0 создан в качестве учебно-демонстрационной площадки для подготовки высококвалифицированных кадров в области управляемого термоядерного синтеза и является хорошей возможностью для студентов получить практические навыки на установке, приближенной по своим свойствам к крупным исследовательским токамакам. При этом сам процесс создания и оснащения токамака, происходящий с активным привлечением студентов, также решает задачу подготовки новых кадров [1]. Одним из примеров подобных работ является создание и поэтапное улучшение системы электромагнитных диагностик.

Электромагнитные диагностики часто применяются на токамаках для определения таких параметров плазмы как ток плазмы, положение плазменного шнура, его форма и др.. На основе данных о магнитном поле, создаваемом в ходе эксперимента, можно получить информацию о характеристиках плазменного шнура [2]. Целью данной работы является создание, калибровка и испытание однокомпонентных электромагнитных зондов (катушек Мирнова) в комплексе с другими диагностиками – поясом Роговского и петлями измерения напряжения на обходе. В результате была успешно апробирована методика, позволяющая определить положения плазменного шнура, созданного в ходе экспериментов на токамаке МИФИСТ-0.

Был создан и размещён комплекс из восьми магнитных зондов (четыре снаружи разрядной камеры и четыре внутри). С помощью использования приведённых ниже общеизвестных формул, были восстановлены зависимости положения плазменного шнура от времени [3]. Упомянутые формулы для определения вертикального и горизонтального смещения соответственно имеют следующий вид:

$$\Delta z = \frac{B_B - B_H}{B_B + B_H} h = \frac{\int (S_{\text{эф}_B} - S_{\text{эф}_H}) dt}{\int (S_{\text{эф}_B} + S_{\text{эф}_H}) dt} h \quad (1)$$

$$\Delta R = \frac{(\Psi_2 - \Psi_1) - 2\pi \cdot d \cdot (R_1 \cdot B_1 + R_2 \cdot B_2)}{2\pi \cdot (R_1 \cdot B_1 - R_2 \cdot B_2)} \quad (2)$$

где  $U_B$  и  $U_H$  – сигналы с верхней и нижней катушки Мирнова соответственно (катушки МР-1 и МР-3 на рисунке 1а соответственно),  $S_{\text{эф}_B}$  и  $S_{\text{эф}_H}$  – эффективные площади верхней и нижней катушки,  $R_1, R_2$  – радиусы петель напряжения на обходе (см. рис. 1б),  $B_1, B_2$  – локальное магнитное поле, измеренное магнитными зондами 2 и 4 соответственно (см. рис. 1б),  $\Psi_1, \Psi_2$  – полоидальные магнитные потоки через внутреннюю и внешнюю петли напряжения на обходе соответственно,  $d$  – расстояние от зонда до середины отрезка, соединяющего пару зондов Мирнова.

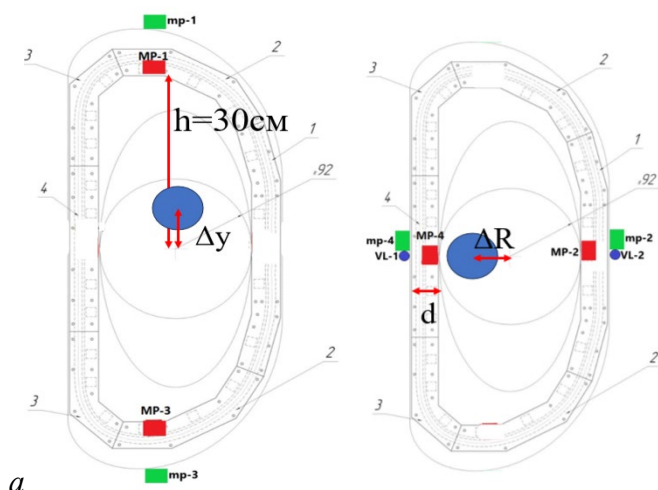


Рис. 1. Расположение электромагнитных диагностик для определения: а) вертикального смещения плазменного шнура б) горизонтального смещения плазменного шнура

Стоит отметить, что пояс Роговского используется для определения и последующего вычитания тороидальной компоненты магнитного поля, влияющей на корректность получаемых результатов.

Также в рамках описанной работы были измерены эффективные площади созданных зондов, они указаны в таблице 1.

Номер зонда	$S_{eff}^{in}$ , см <sup>2</sup>
1	217
2	107
3	180
4	143

*Таблица 1.* Параметры внутрикамерных однокомпонентных зондов.

Описанные зонды и методика определения параметров плазменного шнура будут использованы в дальнейших экспериментах на установке МИФИСТ-0 как важное дополнение общей системы диагностик токамака. На данном этапе этот метод позволил определить положение плазменного шнура на начальных этапах разряда в токамаке МИФИСТ-0.

*Список литературы*

1. S.A. Krat et al, MPhIST-0 tokamak for education and research, Fusion Science and Technology, 79(4):1-19
2. «Диагностический комплекс токамака МИФИСТ-0», В сборнике Тезисы докладов 20я Всероссийская конференция «Диагностика Высокотемпературной Плазмы» 18.09.2023 – 22.09.2023, Сочи, Россия
3. Кольцевой лимитер токамака «МИФИСТ-0» / А. Д. Изарова, А. С. Пришвицын, Н. Е. Ефимов [и др.] // Лазерные, плазменные исследования и технологии. ЛАПЛАЗ-2022 : СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ VIII МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, ПОСВЯЩЕННОЙ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ЛАУРЕАТА НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ БАСОВА НИКОЛАЯ ГЕННАДИЕВИЧА, Москва, 22–25 марта 2022 года. – Москва: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2022. – С. 136. – EDN GARXMU.

И.А. КОЗИН, Е.В. ПАРКЕВИЧ, А.И. ХИРЬЯНОВА, Д.В. ТОЛБУХИН, К.В. ШПАКОВ  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

## УСТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПЛАЗМЫ РАННЕЙ СТАДИИ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Явление филаментации, наблюдаемое при контракции импульсного наносекундного искрового разряда, не имеет установленного механизма развития, но по предположению, оно возникает из-за неустойчивостей в плазме катодных и анодных пятен. Для дальнейшего изучения филаментации представляет интерес установление параметров приэлектродной плазмы на ранней стадии разряда. В данной работе это было осуществлено с помощью лазерного зондирования – интерферометрии на длине волны 1064 нм.

I.A. KOZIN, E.V. PARKEVICH, A.I. KHIRIANOVA, D.V. TOLBUKHIN, K.V. SHPAKOV  
*P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## ESTABLISHING PARAMETERS OF ELECTRODE AREA PLASMA AT AN EARLY STAGE OF A PULSED NANOSECOND SPARK DISCHARGE BY LASER PROBING

The filamentation phenomenon observed while contraction of pulsed nanosecond spark discharge has no established mechanism of development, but it is assumed to occur due to instability in plasma of cathode and anode spots. For further study of filamentation, it is interesting to establish parameters of electrode area plasma at an early stage of discharge. In this work, this was done using laser sensing - interferometry at a wavelength of 1064 nm.

Явление контракции, сопровождающее искровой разряд на его заключительной стадии, заключается в переходе объемного разряда в систему высокопроводящих токовых каналов, триггером формирования которых являются катодные и анодные пятна, являющихся следствием взрывных процессов на поверхности электродов и позволяющих на коротких временах наработать первичную сильноионизованную плазму. В работе [1] показано, что переход импульсного наносекундного разряда в высокоточный режим с субнаносекундной точностью совпадает с моментом появления приэлектродной плазмы высокой степени ионизации, которая может давать старт развитию фронтов мощной ионизации, прокладывающих пути развития искровых каналов с характерным диаметром в несколько сотен микрон. Было установлено [2], что упомянутые выше фронты неустойчивы – в процессе распространения происходит их дробление на нитевидные плазменные каналы диаметром порядка 10–50 мкм. Этот процесс, получивший название мелкокомасштабной искровой филаментации, можно рассматривать как субпроцесс более общего процесса контракции.

По предположению, филаментация возникает из-за неустойчивостей в плазме катодных и анодных пятен, поэтому целью данной работы являлось установление параметров приэлектродной плазмы в моменты до или во время начала формирования микроструктуры. С помощью лазерной диагностики, а именно интерферометрии на длине волны 1064 нм, имеющей хорошую чувствительность по отношению к плазме филаментов, было установлено, что приэлектродная плазма обладает высокой электронной плотностью, порядка  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, а характерные размеры катодного и анодного пятен составили порядка 10 микрон. Между моментами инициирования пятен имеется субнаносекундная задержка, то есть оба пятна появляются практически одновременно. Данный факт не имеет однозначной трактовки и поэтому необходимо проведение дополнительных исследований с целью установления механизма образования анодных пятен. Работа поддержана грантом РФФ №23-19-00524.

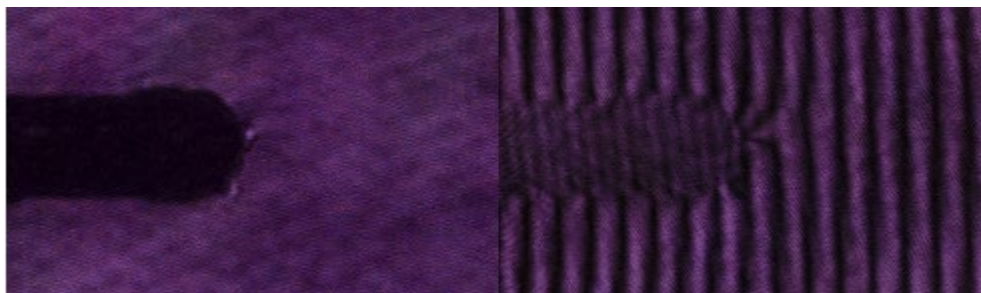


Рис. 1. Теневое изображение ранней стадии разряда в прикатодной области (левая половина) и соответствующая ему интерферограмма (правая). Представлена область катодного пятна с расширяющейся от него приэлектродной плазмой.

### Список литературы

1. Parkevich E.V. and others. Extremely fast formation of anode spots in an atmospheric discharge points to a fundamental ultrafast breakdown mechanism // *Plasma Sources Science and Technology*. 2019. Vol. 28, № 12.
2. Almazova K.I. and others. Microstructure of a Spark Discharge in Air in a Point-Plane Gap // *Tech. Phys.* 2018. Vol. 63, №6, P. 801–805.

В.А. ТУРИКОВ

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия

## НАГРЕВ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ МОЩНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА УДВОЕННОЙ ВЕРХНЕГИБРИДНОЙ ЧАСТОТЕ

Исследован процесс резонансного взаимодействия лазерной волны необыкновенной поляризации на удвоенной верхнегибридной частоте с плазмой в неоднородном магнитном поле. Показано, что в таком взаимодействии имеет место вынужденное комбинационное рассеяние для волны, падающей из вакуума на слой плазмы. При этом нелинейное взаимодействие лазерного излучения с верхнегибридными плазмонами приводит к сильному возрастанию энергии электронов.

V.A. TURIKOV

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

## PLASMA ELECTRON HEATING BY POWERFUL LASER RADIATION ON THE DOUBLE UPPERHYBRID FREQUENCY

The process of resonant interaction of a laser wave of extraordinary polarization at a doubled upper hybrid frequency with plasma in an inhomogeneous magnetic field was investigated. It has been shown that in such an interaction there is a stimulated Raman scattering for a wave incident from a vacuum onto a plasma layer. At the same time, the nonlinear interaction of laser radiation with upper hybrid plasmons leads to a strong increase in electron energy.

Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой на удвоенной верхнегибридной частоте широко используется для нагрева плазмы в магнитных ловушках. Однако, в случае мощного лазерного излучения влияние нелинейности может сильно изменить такое резонансное взаимодействие (см., например, обзор [1]). Магнитное поле при этом должно иметь значения от нескольких МГс до нескольких десятков МГс.

Исследование такого взаимодействия для излучения на верхнегибридной частоте было недавно проведено в работе [2] с помощью одномерного численного моделирования по методу частиц в ячейке. В данной работе рассмотрен процесс резонансного лазерного нагрева на удвоенной верхнегибридной частоте. В этом случае возрастает инкремент параметрической неустойчивости и снижается величина резонансного магнитного поля.

Численное моделирование проводилось с использованием релятивистского электромагнитного кода 1D2V. Рассматривался лазерный импульс необыкновенной поляризации, распространяющийся поперек внешнего неоднородного магнитного поля. Импульс двигался из вакуума и падал на слой плазмы, в центре которого выполнялось условие резонанса на удвоенной верхнегибридной частоте. Численные эксперименты показали, что при этом для падающей волны имеет место обратное рассеяние (красный спутник) и рассеяние вперед (фиолетовый спутник). На Рис.1 представлено распределение поперечного поля после прохождения импульса через резонансную область.

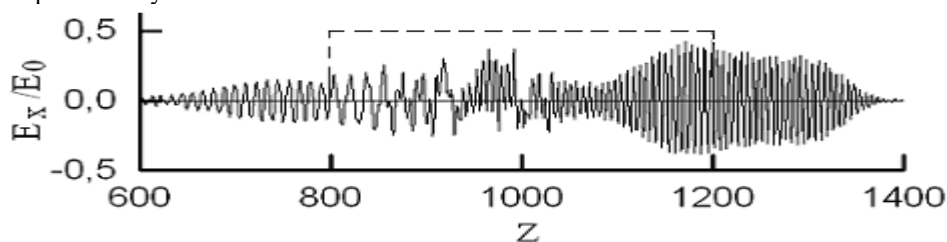


Рис. 1. Поперечное поле  $E_x$  в единицах начальной амплитуды после прохождения импульса через слой плазмы.

В результате нелинейного взаимодействия падающего и рассеянного излучения происходит возрастание красного спутника и передача энергии волны электронам плазмы, которая может достигать до 70% от начальной энергии импульса

### Список литературы

1. Turikov V.A. // Plasma Phys. Rep. (a review). 2022. V. 49. № 4. P. 535- 544.
2. Maity S., Goswami L., Vashista A. et al // Phys. Rev. E. V. 105. 055209

М.С. НОВИКОВ<sup>1</sup>, М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, Г.С. ЛОМОНОСОВ<sup>1</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>,  
А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>, О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ СМЕСЕЙ He/D<sub>2</sub>

Измерены концентрация, температура и плавающий потенциал плазмы импульсного магнетронного разряда с вольфрамовой мишенью в смесях He/D<sub>2</sub> и He/H<sub>2</sub> зондовым методом в зависимости от плотности мощности разряда. Зондовые измерения возможно проводить для импульсов длительностью более 100 мкс. Плотность плазмы составила  $\sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$  при температуре 3–4 эВ в зависимости от плотности мощности в разряде.

M.S. NOVIKOV<sup>1</sup>, M.M. KHARKOV<sup>1</sup>, G.S. LOMONOSOV<sup>1</sup>, D.V. KOLODKO<sup>1,2</sup>, A.V. KAZIEV<sup>1</sup>,  
A.V. TUMARKIN<sup>1</sup>, O.V. OGORODNIKOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

## PLASMA PARAMETERS ANALYSIS IN A PULSED MAGNETRON DISCHARGE IN He/D<sub>2</sub> AND He/H<sub>2</sub> MIXTURES

Plasma density, electron temperature, and floating potential were measured by an electric probe in a pulsed magnetron discharge with a tungsten target in mixtures of He/D<sub>2</sub> and He/H<sub>2</sub> for different power density values. The probe diagnostics can be used for pulses with a duration exceeding 100  $\mu\text{s}$ . The plasma density was  $\sim 10^{10} - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , and the electron temperature was 3–4 eV depending on the power density.

В ходе работы термоядерных реакторов в поверхности материалов, обращённых к плазме, накапливаются топливо и продукты термоядерной реакции [1]. При воздействии плотных потоков частиц в диверторе помимо накопления происходит и перепыление материала тайлов. Соосаждение приводит к изменению характера захвата частиц [2]. Для моделирования такого процесса может использоваться магнетронная распылительная система. В частности, для создания больших ионных потоков хорошо подходит импульсный магнетронный разряд высокой мощности (HiPIMS) [3]. В таком разряде можно управлять параметрами плазмы в широком диапазоне посредством изменения плотности мощности [4].

В настоящей работе измерялись концентрация и температура гелий-дейтериевой плазмы импульсного магнетронного разряда высокой мощности с вольфрамовой мишенью. Измерения проводились зондовым методом. Цилиндрические зонды Ленгмюра устанавливались напротив рейстрекка на расстоянии 70 мм и 30 мм от поверхности мишени. Магнетрон работал в импульсном режиме HiPIMS со средней мощностью 500 Вт и частотой импульсов 500 Гц. Плотность мощности импульса разряда варьировалась в диапазоне 50–1300 Вт/см<sup>2</sup> путём изменения длительности. Измерения проводились для гелий-водородной и гелий-дейтериевой смесей в соотношениях 1:1 и 1:3. Суммарное давление рабочей смеси во всех экспериментах  $3,3 \times 10^{-2}$  Торр.

Для импульсов короче 100 мкс измерения зондовой характеристики не представляется возможной в силу того, что ионный ток ещё не стабилизируется (рис. 1а, область 1). Для стабилизированных режимов разряда (рис. 1а, область 2) по ВАХ зонда Ленгмюра (рис. 1б) определены параметры плазмы: измеренная плотность плазмы на расстоянии 30 мм от мишени примерно в три раза выше, чем на расстоянии 70 мм, и составляет  $\sim 10^{10} - 10^{11} \text{ см}^{-3}$  в зависимости от режима работы магнетрона.

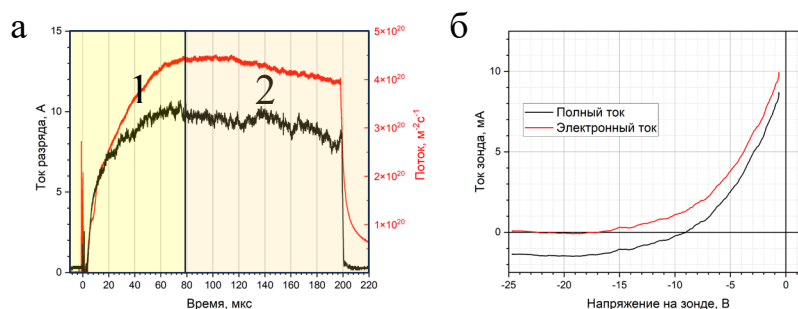


Рис. 1. а – Осциллограмма тока разряда и потока на собирающий зонд; б – типичная ВАХ зонда в стабильном разряде.

### Список литературы

1. De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. Vol. 60, № 4. P. 044018.
2. S. Krat, et al. “Tungsten-deuterium co-deposition: Experiment and analytical description” // Vacuum. 2018. T. 149.
3. A. V. Kaziev, et al. // IEEE 2021, 978-1-7281-4314-9/21
4. M.M. Kharkov, et al. // High Temperature Material Processes 2023. Vol. 27, №4. P. 25-32.

Ю.М. КРЫЛОВ, Д.Н. СОВЫК, В.Г. РАЛЬЧЕНКО

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕРМОДИНАМИКУ КЛЮЧЕВЫХ РЕАКЦИЙ ТРАВЛЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В КИСЛОРОД-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ**

При воздействии водородной плазмы на диоксид кремния для очистки поверхности или в процессе темплатного синтеза, темплатом в котором являются структуры из диоксида кремния, происходит нежелательное травление диоксида кремния водородом и его радикалами. Известно, что добавка относительно небольшого количества кислорода существенно замедляет это травление. Однако с ростом температуры ингибирование кислородом резко падает. В данной работе представлены результаты расчёта методом Чейза констант равновесия ключевых химических реакций травления  $\text{SiO}_2$  водородом до Si, SiO и обратных процессов окисления кислородом Si, SiO до  $\text{SiO}_2$  при температурах от 700°C до 1300°C с шагом 100°C. Для интерпретации данных приводятся температурные зависимости энтропии, энтальпии и энергии Гиббса рассматриваемых реакций.

YU.M. KRYLOV, D.N. SOVYK, V.G. RALCHENKO

*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE THERMODYNAMICS OF KEY ETCHING REACTIONS OF SILICON DIOXIDE IN OXYGEN-HYDROGEN PLASMA**

When hydrogen plasma is used for surface cleaning of silicon dioxide or in the synthesis of templates, which are made of silicon dioxide, undesirable etching of the silicon dioxide occurs with hydrogen and its radicals. It is known that adding a relatively small amount of oxygen can significantly slow down this etching process. However, as the temperature increases, the oxygen inhibition drops sharply. This report presents the results of a calculation using the Chase method to determine the equilibrium constants for the key chemical reactions involved in the etching of  $\text{SiO}_2$  with hydrogen to form Si and SiO, and the reverse oxidation processes of Si and SiO with oxygen to produce  $\text{SiO}_2$ . The calculations were performed at temperatures ranging from 700°C to 1300°C in increments of 100°C. To interpret the data, we have provided the temperature dependences of the entropy, enthalpy, and Gibbs energy for the reactions under study.

Плазмохимическая очистка в водородной среде поверхности элементов из диоксида кремния в электронике, так же как и оптических элементов из кварцевого стекла позволяет сохранять высокую чистоту поверхности. Однако воздействие атомарного или молекулярного водорода приводит и к росту (1) шероховатости при восстановлении  $\text{SiO}_2$  до газообразного  $\text{SiH}_4$ , а также росту (2) оптического поглощения, (3) показателя преломления и (4) электропроводности при восстановлении поверхности кварцевого стекла до  $\text{SiO}_x$  ( $0 < x < 2$ ). Для замедления травления  $\text{SiO}_2$  было предложено добавлять в газовую фазу небольшое (около 1-2%) количество кислорода. Оказалось, что экспериментально измеренная энергия активации для процесса травления диоксида кремния в водородной СВЧ плазме (частота 2.45 ГГц) растёт в 2.15 раза при добавке всего 0.4% кислорода [1], и скорость травления  $\text{SiO}_2$  существенно снижается.

Для объяснения данного эффекта были проведены термодинамические расчёты основных химических реакций в системе  $\text{SiO}_2\text{-O}_2\text{-H}_2$ , протекающих в основном на границе раздела твёрдой и газовой фаз при температурах, типичных для плазмохимического синтеза алмаза: от 700°C до 1300°C. Реагентами и продуктами данных реакций являются:  $\text{SiO}_2$ , SiO, Si,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , а также радикалы H, O, OH. Термодинамические функции – энтальпия, энтропия и Энергия Гиббса были теоретически рассчитаны по аналитическим уравнениям Чейза [2]. По сравнению с полуаналитическим методом Темкина-Шварцмана, расчёт по Чейзу позволяет на порядок ускорить расчёт температурных зависимостей для констант равновесия реакций и остальных термодинамических функций. Недостатком метода Чейза является отсутствие справочных коэффициентов для ионов (например,  $\text{OH}^-$  или  $\text{H}^+$ ), что не позволяет рассчитать все возможные реакции. Тем не менее согласно нашему предыдущему исследованию [3], такие реакции имеют малые константы равновесия, что позволяет пренебречь ими на первом этапе.

Проведенные нами расчёты показали, что результаты по Чейзу и по Темкину-Шварцману для одних и тех же реакций отличаются примерно на 5%. В докладе приводятся результаты термодинамических расчётов в более широком температурном диапазоне, чем ранее, и более детально: с шагом 100°C. Делаются выводы, объясняющие аномальное влияние кислорода на замедление восстановления диоксида кремния в водород-кислородной плазме.

### *Список литературы*

1. V.Yu. Yurov, A.P. Bolshakov, I.A. Fedorova et al. // Appl. Surf. Sci. 2023. Vol. 612, No. 155834.
2. Chase, M.W., Jr. // NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition. J. Phys. Chem. Ref. Data. Monograph 9. 1998. 1-1951.
3. Д.Н. Совык, Ю.М. Крылов, В.Ю. Юров и др. // Сборник научных трудов IX Межд. конф. «ЛаПлаз-2023», 28-31 марта 2023 года, НИЯУ МИФИ, Москва, 440 с., С. 178.



## СПЕЦИФИКА СТРУКТУРЫ МИКРОПИНЧЕВОГО РАЗРЯДА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ПОЛЯРНОСТИ НА ЭЛЕКТРОДАХ

С помощью комплекса рентгеновских и лазерных диагностик исследована пространственная структура плазмы в сильноточном (150 кА) микропинчевом разряде на установке типа «низкоиндуктивная вакуумная искра» (НВИ) с геометрией разрядного промежутка «острие – плоскость» и различной полярностью на электродах. Анализ рентгеновских спектров показал, что максимальная температура плазмы и интенсивность рентгеновского излучения достигаются при остром аноде.

O.A. BASHUTIN, E.D. VOVCHENKO, I.G. GRIGORYEVA, A.S. SAVJOLOV, G.Kh. SALAKHUTDINOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SPECIFICITY OF THE STRUCTURE OF MICROPINCH DISCHARGE AT DIFFERENT POLARITY ON ELECTRODES

Using a complex of X-ray and laser diagnostics, the spatial structure of plasma in a high current (150 kA) micropinch discharge was studied using a “low-inductance vacuum spark” type installation with a “tip-plane” discharge gap geometry and different polarities on the electrodes. Analysis of the X-ray spectra showed that the maximum plasma temperature and X-ray intensity are achieved at the tip anode.

Исследования НВИ проводились на двух сильноточных (150 кА) микропинчевых установках ПФМ-72 и Зона-2, имеющих близкие параметры разрядного контура (емкость 12 и 20 мкФ, период разрядного тока 5 и 8,5 мкс) и одинаковую геометрию разрядных электродов «острие – плоскость» [1, 2]. Однако полярность напряжения на высоковольтных острых электродах была разная (отрицательная на ПФМ-72 и положительная на Зоне-2).

Визуализация межэлектродного промежутка теньвым методом с ТЕА N<sub>2</sub> лазером в качестве источника света показало, что в разрядах с острым анодом развитие перетяжки протекает быстрее. После инициирования разряда с помощью вспомогательной искры у поверхности обоих электродов появляются непрозрачные области, которые быстро увеличиваются и переходят во встречное движение потоков вещества, приводящее к замыканию плазменного канала и развитию неустойчивостей. В разрядах же с острым катодом непрозрачная область появляется первоначально у плоского анода и только спустя несколько сотен наносекунд у поверхности катода. Затем, как и в предыдущем случае, формируется плазменный канал, быстро теряющий свою устойчивость.

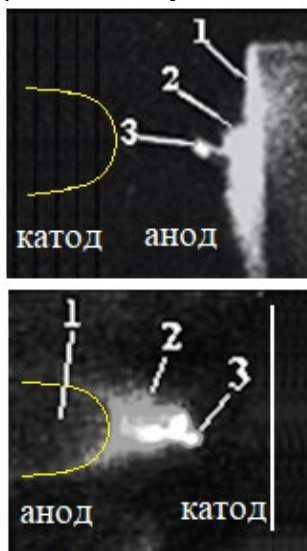


Рис. 1. Обскурограммы РИ  
1 – анод; 2 – прианодная плазма; 3 – плазменная точка

Кроме лазерной диагностики одним из основных источников информации о протекающих в НВИ физических процессах является рентгеновское излучение (РИ). Исследование РИ плазмы НВИ в диапазоне энергий квантов ( $h\nu > 3$  кэВ) выполнено с помощью камеры-обскуры с регистрацией на фотослой, перед которым устанавливался защитный фильтр в виде Ве фольги толщиной 100 мкм. Типичные обскурограммы РИ при различной полярности электродов и большом разрядном токе ( $\approx 150$  кА), приводящем к глубокому сжатию пинча, показаны на рис. 1. На всех изображениях наблюдается области РИ у поверхности анода, а также более яркое РИ из плазменных точек (ПТ), местоположение которых практически не изменялось при смене полярности на разрядных электродах.

Дополнительные исследования с использованием в качестве детектора ядерной эмульсии и сцинтилляционных детекторов показали, что в разрядах с острым анодом температура плазмы и интенсивность рентгеновского излучения заметно выше, чем в разрядах с острым катодом. Вероятно, это связано с более высокой напряженностью электрического поля у поверхности острого анода.

Для регистрации спектрального состава РИ в диапазоне энергий квантов 2÷70 кэВ с временным разрешением применен пятиканальный спектрометр с набором поглотителей и сцинтилляционными детекторами. Восстановленные по результатам этих измерений мгновенные спектры РИ  $I = f(h\nu)$  свидетельствуют о том, что именно моменту образования плазменной точки соответствует наиболее интенсивное рентгеновское излучение, более высокая температура плазмы и наличие жесткой компоненты РИ с энергией квантов более 50 кэВ.

### Список литературы

1. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Кадетов В.А., Коротаев К.Н., Ли Джэн Хун, Прохорович Д.Е., Савёлов А.С., Сивко П.А. // Препринт 015-98, М.: МИФИ, 1998.
2. Башутин О.А., Вовченко Е.Д., Додулад Э.И., Савёлов А.С., Саранцев С.А. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 261.

А.И. САЙФУТДИНОВ<sup>1</sup>, Е.В. КУСТОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФИЛАМЕНТАЦИИ МИКРОВОЛНОВЫХ РАЗРЯДОВ

В работе сформулирована самосогласованная модель СВЧ-разрядов в молекулярных и атомарных газах. Численные расчеты проведены для разрядов в азоте с примесью кислорода и в чистом гелии при средних и высоких давлениях. Продемонстрирована динамика вытягивания СВЧ-плазмоидов, формирования их диффузной формы и переход в филаментированную. Исследовано влияние эффекта быстрого нагрева на динамику СВЧ-разряда в азоте. Результаты численных расчетов сопоставлены с известными экспериментальными данными.

A.I. SAIFUTDINOV, E.V. KUSTOVA

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after. A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

<sup>2</sup>St. Petersburg State University, St. -Petersburg, Russia

## NUMERICAL STUDY OF THE DYNAMICS OF MICROWAVE DISCHARGE FILAMENTATION

The work formulates a self-consistent model of microwave discharges in molecular and atomic gases. Numerical calculations were carried out for discharges in nitrogen with an admixture of oxygen and in pure helium at medium and high pressures. The dynamics of elongation of microwave plasmoids, formation of their diffuse form and transition to filamentation have been demonstrated. The influence of the rapid heating effect on the dynamics of a microwave discharge in nitrogen has been studied. The results of numerical calculations are compared with known experimental data.

В работе сформулирована самосогласованная физико-математическая модель, позволяющая описать динамику формирования плазмы в микроволновых или сверхвысокочастотных (СВЧ) разрядах в атомарных и молекулярных газах. Модель основана на расширенном гидродинамическом описании плазмы и включает в себя уравнение Гельмгольца для описания СВЧ электромагнитной волны, систему уравнений неразрывности для заряженных и возбужденных частиц, уравнение баланса плотности энергии электронов, уравнение баланса энергии для тяжелой компоненты плазмы, систему уравнений Навь-Стокса для описания газодинамических эффектов в области формирования разряда.

Численные расчеты проведены для разрядов в чистом азоте и чистом гелии, а также в азоте с малыми примесями кислорода при средних и высоких давлениях. Продемонстрирована динамика вытягивания СВЧ плазмоида, формирование его диффузной формы и переход в филаментированную форму. Для разрядов в азоте исследованы, так называемые, эффекты быстрого нагрева газа, а также чувствительность некоторых констант элементарных процессов на динамику параметров плазмы.

Результаты численных расчетов были сопоставлены с известными в литературе экспериментальными данными [1] и было получено хорошее согласие.

Периодический по текущей фазе характер такого вида искажений позволяет предложить достаточно простой механизм подавления данного вида помех путем Фурье фильтрации измеряемых перемещений. Такой подход применим, когда диапазон регистрируемых перемещений существенно превышает несколько длин волн используемого лазерного излучения.

### Список литературы

1. Saifutdinov A., Kustova E. //Plasma Sources Science and Technology. 2023. Vol. 32. №. 12. P. 125010.
2. Saifutdinov A. I., Kustova E. V. //Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 129. №. 2.
3. Saifutdinov A. I. et al. //Plasma Physics Reports. 2019. Vol. 45. P. 602-609.
4. Vikharev A.L., et al. Plasma Phys. Rep. 1992. Vol. 18, №1.

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ПРИ ПЕРЕХОДЕ В ДЛИННОВОЛНОВУЮ ОБЛАСТЬ

Показано, что в методе лазерного зондирования разрешающая способность структуры искрового канала увеличивается при переходе от 532 нм к 1064 нм, что позволяет получать количественные данные о параметрах плазмы одного микроканала.

SMAZNOVA K.T., PARKEVICH E.V.

*Lebedev Physical Institute, Russian Academy, Moscow, Russia*

## INCREASING THE SENSITIVITY OF SPARK DISCHARGE DIAGNOSTICS DURING THE TRANSITION TO THE LONG-WAVE REGION

It was shown that in the laser sensing method, the resolution of the spark channel structure increases during the transition from 532 nm to 1064 nm, which makes it possible to obtain quantitative data on the plasma parameters of a single microchannel.

В этой работе впервые были исследованы искровые микроканалы с высоким разрешением методом лазерного зондирования с одновременной регистрацией на двух длинах волн 532 нм и 1064 нм (рис. 1). Искра образовывалась в воздухе при атмосферном давлении в миллиметровом зазоре между анодом и катодом при подаче высоковольтного импульса до 25 кВ при максимальном токе 300 А. Показано, что переход в длинноволновую область позволяет получать более информативные данные о плазменных микроканалах на стадии их роста. Установлено, что для областей локального разряда микроканалы на стадии роста могут иметь максимальную электронную плотность от  $8 \cdot 10^{18}$  до  $4,5 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup> с характерным диаметром одного микроканала около 20 мкм (рис. 2).

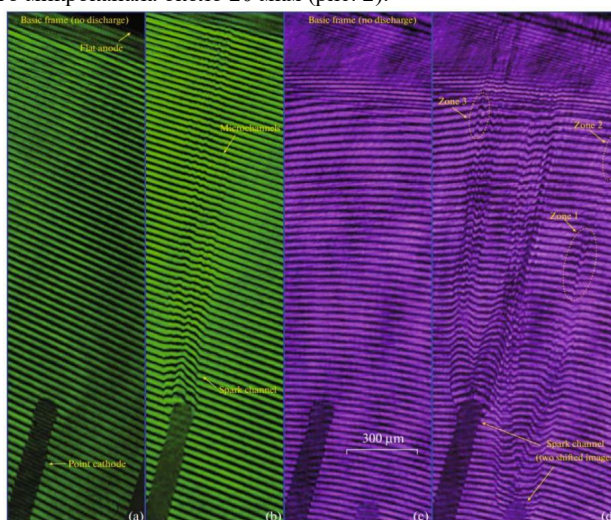


Рис. 1. (a-d) Интерферограммы разрядного промежутка, зарегистрированные (a, c) без образования искры и (b, d) во время её развития на длинах волн (a,b) 532 нм и (c,d) 1064 нм

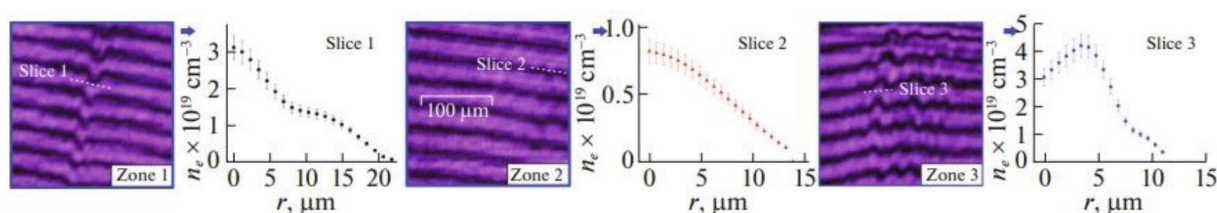


Рис. 2. Результаты обработки интерферограмм в трёх областях и соответствующие распределения электронных плотностей.

### Список литературы

1. Parkevich, E.V., et al., Fast fine-scale spark filamentation and its effect on the spark resistance, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2019, vol. 28, no. 9, p. 095003. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab3768>
2. Almazova, K.I., et al., Microstructure of a spark discharge in air in a point-plane gap, *Tech. Phys.*, 2018, vol. 63, no. 6, pp. 801–805. <https://doi.org/10.1134/S1063784218060026>
3. Korolev, Y.D. and Mesyats, G.A., *Fizika impulsnogo razryada v gazakh* (Physics of Pulsed Breakdown in Gases), Yekaterinburg: Ural Division of the Russian Academy of Science, 1998.
4. Ostrovskaya, G.V., Holographic diagnostics of the plasma: A review, *Tech. Phys.*, 2008, vol. 53, pp. 1103–1128. <https://doi.org/10.1134/S1063784208090016>
5. Parkevich, E.V., et al., Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions, *Opt. Lasers Eng.*, 2019, vol. 116, pp. 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.0>

## ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА ПФМ-72М

Представлены результаты исследований потоков частиц и излучений, генерируемых в разряде типа плазменный фокус. Проведена оценка плотности энергии плазменного потока, распространяющегося вдоль оси электроразрядной системы. Исследован спектр рентгеновского излучения и выявлена корреляция между энергией жесткого рентгеновского излучения и величиной нейтронного выхода, свидетельствующая об ускорительном механизме генерации нейтронов.

O.A. BASHUTIN, P.P. SIDOROV, K.I. KOZLOVSKIY, G.H. SALAHUTDINOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## RADIATIVE PARAMETERS OF THE PLASMA FOCUS DEVICE PFM-72M

The results of studies of particle fluxes and radiation generated in a plasma focus type discharge are presented. The energy density of the plasma flow propagating along the axis of the electric discharge system has been estimated. The X-ray spectrum has been studied and a correlation between the energy of hard X-ray radiation and the magnitude of the neutron yield has been revealed, indicating an accelerating mechanism of neutron generation.

Высоко интенсивные источники заряженных частиц и излучения находят все более широкое применение в различных областях науки и техники, от моделирования комплексного воздействия на материалы до моделирования астрофизических объектов. Среди таких источников выделяются электроразрядные системы типа плазменный фокус, обладающие высокими излучательными характеристиками и способные обеспечить одновременное воздействие на материалы интенсивных потоков заряженных частиц, рентгеновского излучения и нейтронов.

В работе представлены результаты исследований потоков частиц и излучений, генерируемых в разряде типа плазменный фокус на установке ПФМ-72м МИФИ [1]. В качестве рабочих газов использовались аргон, водород и дейтерий. Период колебаний разрядного тока составлял 5.2 мкс. Амплитуда тока разряда достигала 360 кА.

Оценка плотности энергии плазменного потока, распространяющегося вдоль оси электродной системы осуществлялась по изменению температуры медной мишени с закрепленной на ней термопарой, установленной на расстоянии 8 см от среза анода. Экспериментально полученные значения прироста температуры термопары при воздействии плазменного потока на мишень сравнивались с расчетными значениями, полученными при моделировании в программной среде Comsol для разных значений передаваемой мишени энергии. При токе разряда 360 кА наилучшее совпадение достигалось для вложенной в мишень энергии  $\sim 9$  Дж и слабо зависело от типа рабочего газа (аргон или водород). При длительности импульса облучения  $t \sim 1$  мкс это соответствует плотности мощности плазменного потока  $\sim 2 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>.

Использование в качестве рабочего газа дейтерия сопровождается генерацией жесткого рентгеновского излучения и потока нейтронов с энергией 2.45 МэВ. Спектр рентгеновского излучения исследовался методом фильтров поглощения [2]. Для регистрации излучения использовались сборки термолюминисцентных детекторов и сцинтилляционный детектор на базе сцинтиллятора NaI(Tl) и ФЭУ. Зарегистрировано излучение с энергией квантов от единиц кэВ до 1 МэВ.

Для измерения нейтронного выхода использовался детектор нейтронов на основе счетчика нейтронов СНМ-10, который размещался внутри замедлителя, выполненного в виде блока из органического стекла размером 18x18x27 см<sup>3</sup>. Расстояние между счетчиком нейтронов и осью разрядной камеры установки составляло 145 см. Измеренная величина выхода нейтронного излучения варьировалась от разряда к разряду в диапазоне  $10^7 \div 10^8$  нейтронов за импульс. Максимальный зарегистрированный выход нейтронов, достигнутый при амплитуде тока разряда 360 кА, составил  $3 \cdot 10^8$  н/имп.

Отмечена корреляция между величиной нейтронного выхода и жесткостью регистрируемого рентгеновского излучения. Рост энергии регистрируемых из разряда  $\gamma$ -квантов сопровождается увеличением выхода нейтронного излучения. Это свидетельствует о преимущественно ускорительном механизме D-D реакций, происходящих в разряде плазменного фокуса.

### Список литературы

1. Башутин О.А., Сидоров П.П. // Сб.: Лазерные и плазм. исслед. и технологии ЛАПЛАЗ-2019. V Междунар. конф. 2019. С. 49-50.
2. Дементьев В.Н., Зверев С.А., Казаринов Г.И. и др. // Экспериментальные методы ядерной физики. М.: Атомиздат, 1979. Вып.5. С.58.

И.С. БАЙДИН, К.С. ВИНОГРАДОВА, А.В. ОГИНОВ, П.А. ПАВЛОВА, Е.В. ПАРКЕВИЧ,  
А.А. ТАРАСЕНКО, А.И. ХИРЬЯНОВА, К.В.ШПАКОВ.

*Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

## **СПЕКТРАЛЬНО-ВРЕМЕННЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ СВЧ В ПРЕДПРОБОЙНОЙ СТАДИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ИСКРОВОГО РАЗРЯДА**

Рассмотрены результаты экспериментов по изучению особенностей генерации СВЧ излучения, регистрируемого на предпробойной стадии сильноточного искрового разряда. Показаны зоны локализации источников СВЧ и динамика их развития во времени и в пространстве. Показано изменение спектрального состава СВЧ излучения на различных стадиях электрического пробоя.

I.S. BAIDIN, K.S. VINOGRADOVA, A.V. OGINOV, P.A. PAVLOVA, E.V. PARKEVICH, A.A.  
TARASENKO, A.I. KHIRIANOVA, K.V. SHPAKOV.

*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **SPECTRAL-TEMPORAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF MICROWAVE SOURCES IN THE PRE-BREAKDOWN STAGE OF HIGH-VOLTAGE SPARK DISCHARGE**

The results of experiments on the study of the characteristics of the generation of microwave radiation recorded at the pre-breakdown stage of a high-current spark discharge are considered. The zones of localization of microwave sources and the dynamics of their evolution in time and space are shown. The change in the spectral composition of microwave radiation at various stages of electrical breakdown is shown.

В работе демонстрируется система радиорегистрации, основанная на четырёх сверхширокополосных антеннах, позволяющая локализовать источники СВЧ-излучения в высоковольтном (до 1 МВ) протяженном (до 1 м) искровом разряде с сантиметровой точностью и исследовать временную и пространственную корреляцию источников СВЧ со структурами разряда. [1]. Мы демонстрируем результаты локализации источников СВЧ как для положительной, так и для отрицательной полярности импульса напряжения. Можно отметить, что большинство локализованных источников сосредоточено либо вблизи, либо на поверхности электродов. Установлено, что механизм генерации интенсивного СВЧ-излучения в лабораторном разряде не может быть однозначно связан с такими базовыми процессами, как лобовое столкновение стримеров противоположной полярности или взаимодействие одиночных стримеров с приэлектродной плазмой на поверхности металлических электродов. Обнаружено, что наблюдаемое СВЧ-излучение появляется в основном как предвестник интенсивного развития плазмы.

Выполнено исследование временной корреляции между рентгеновским и радио излучением в полосе частот от 1 до 6 ГГц, сопровождающими развитие лабораторного высоковольтного разряда. [2]. Демонстрируется, что появление рентгеновского и радио излучения коррелирует с началом нарастания тока в разрядном промежутке. Показано, что рентгеновское излучение может появиться одновременно с СВЧ-излучением или позже него с определенной задержкой, но не наблюдается ситуаций, когда рентгеновское излучение наблюдается раньше СВЧ. На стадии развития разряда, когда СВЧ излучение прекращает генерироваться, рентгеновское излучение так же не наблюдается. Высказано предположение о существовании особых процессов формирования разряда, которые синхронно вызывают генерацию рентгеновского и СВЧ-излучения, на стадии когда разрядная среда становится в достаточной степени проводящей.

### *Список литературы*

1. Natural sources of intense ultra-high-frequency radiation in high-voltage atmospheric discharges / Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F. [et al.] // *Physical Review E*. – 2023. – Vol. 108. – No 2. – p. 025201 – DOI 10.1103/PhysRevE.108.025201
2. Temporal correlation between hard x rays and radio emissions in the MHz and GHz frequency ranges generated by a laboratory high-voltage discharge / Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F. [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2023. – Vol. 134. – No 15. – p. 153303 – DOI 10.1063/5.0168616

А.М. АЛЁХИН, Е.Д. ВОВЧЕНКО, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Е.А. МОРОЗОВА,  
И.Г. ГРИГОРЬЕВА, Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, А.Е. ШИКАНОВ  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## КОЛЛЕКТОРНЫЕ И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ В НАНОСЕКУНДНОМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ

Сообщается о первых результатах регистрации быстрых ионов и рентгеновского излучения в вакуумном сильноточном (до 70 кА) наносекундном ( $T/2 \approx 500$  нс) искровом разряде с лазерным инициированием при фокусировке излучения на анод разрядной системы. С помощью времяпролетной коллекторной методики зарегистрированы ионы материала электродов (Fe, Cu, Zn) со скоростями вплоть до  $3 \cdot 10^8$  см/с. Диагностика на основе ТЛД показала широкий спектр РИ с энергиями  $\gamma$ -квантов, превышающими ускоряющее напряжение на разрядном промежутке.

A.M. ALYOKHIN, E.D. VOVCHENKO, K.I. KOZLOVSKY, E.A. MOROZOVA,  
I.G. GRIGORYEVA, G.Kh. SALAKHUTDINOV, A.E. SHIKANOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## COLLECTOR AND X-RAY MEASUREMENTS IN NANOSECOND LASER-INITIATED SPARK DISCHARGE

The first results of recording fast ions and X-ray radiation in a vacuum high current (up to 70 kA) nanosecond ( $T/2 \approx 500$  ns) spark discharge with laser initiation when focusing radiation on the anode of the discharge system are reported. Using the time-of-flight collector technique, ions of the electrode material (Fe, Cu, Zn) were recorded at velocities up to  $3 \cdot 10^8$  cm/s. Diagnostics based on TLD showed a wide spectrum of X-ray radiation with  $\gamma$ -quanta energies exceeding the accelerating voltage across the discharge gap.

Разработана компактная сильноточная разрядная система типа Z-пинч с лазерным инициированием, работающая при остаточном давлении  $\sim 10^{-5}$  торр. Лазерный импульс ( $E \sim 800$  мДж,  $\tau_{\text{имп}} \sim 10$  нс) фокусируется на внутреннем высоковольтном электроде (анод) с центральной вставкой в виде лазерной мишени из различных материалов (Fe, Cu, Zn), формирующих состав рабочего вещества плазмы. Катод выполнен из стали в форме диска с центральным отверстием  $D = 12$  мм. Расстояние между электродами  $d \approx 8$  мм. В качестве накопителя энергии используется конденсатор с емкостью 0,6 мкФ. Ток разряда измеряется поясом Роговского. Потoki быстрых ионов регистрируются с помощью коллектора ионов, расположенного на расстоянии  $L = 115$  см от лазерной мишени (рис. 1). Эксперименты показали, что быстрая составляющая лазерной плазмы имеет скорость  $\sim 3 \cdot 10^8$  см/с.

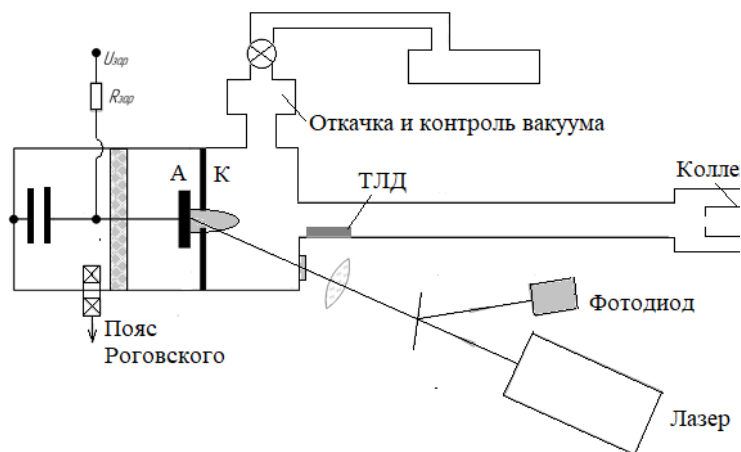


Рис. 1. Схема эксперимента

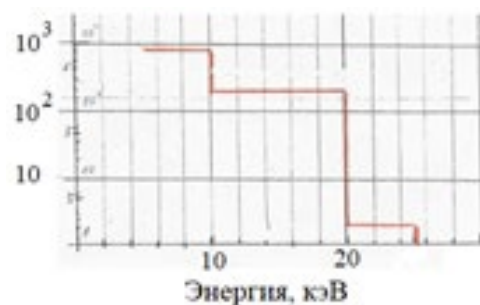


Рис. 2. Спектр РИ

Для исследования спектрального распределения рентгеновского излучения (РИ) применен откалиброванный термолуминесцентный детектор (ТЛД) на основе LiF. Такой ТЛД нечувствителен к электромагнитным наводкам, а также к ультрафиолетовому излучению и мягкому РИ. Он выполнен в виде цилиндра диаметром 5 мм и располагался в вакуумной камере на расстоянии  $\approx 20$  см от разрядного промежутка. Разряд возбуждался в режиме ограничения тока, что приводило к протеканию тока только в течение первого периода (переходной режим от колебательного к аperiodическому разряду). Это достигалось добавлением в разрядную цепь активного сопротивления 0,1 Ом. На рис. 2 показано спектральное распределение РИ, восстановленное из информации об энергии, поглощенной в ТЛД. В режиме без ограничения тока верхняя граница спектра РИ увеличивалась в сторону больших энергий.

## ПРОЕКТ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ

Разработана система для диагностирования потока быстрых многозарядных ионов с зарядами  $+1...+30$ , атомными весами  $2 - 70$  и скоростями  $\sim 10^7...10^9$  см/с, образующихся в малоиндуктивном искровом разряде. Система включает в себя фильтр Вина и масс-спектрометр с шестью коллекторами, размещенными в одном корпусе.

Е.А. MOROZOVA, E.D. VOVCHEKNO, K.I. KOZLOVSKY  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PROJECT OF CORPUSCULAR DIAGNOSTICS FOR REGISTRATION OF MULTICHARGED IONS IN SPARK DISCHARGE WITH LASER INITIATION

A system for diagnosing the flow of fast multi-charged ions with charges  $+1...+30$ , atomic weights  $2 - 70$  and velocities  $\sim 10^7...10^9$  cm/s formed in a low-inductive spark discharge has been developed. The system includes a Wien filter and a mass spectrometer with six collectors placed in one volume.

В данной работе рассматривается проект корпускулярной диагностики многозарядных ионов (МЗИ), включающий в один модуль фильтр Вина и масс-спектрометр на постоянных магнитах (рис. 1). Фильтр Вина, размещенный во входной части диагностического, осуществляет первичную селекцию заряженных частиц по скоростям в скрещенных однородных электрическом  $E$  и магнитном  $B_1$  полях, пропуская только частицы со скоростями  $V = E/B_1$ . Выбор скорости осуществляется за счет варьирования величины  $E$  при подаче напряжения на электростатические пластины 5 и 6. Магнитное поле  $B_1 = 0,1 - 0,5$  Тл создается постоянными неодимовыми магнитами (NdFeB).

Для разделения ионов одного сорта по зарядам предназначен компактный магнитный масс-спектрометр, попадая в который ионы движутся в однородном постоянном поле  $B_2 = 0,05 - 0,15$  Тл по определенным радиусами  $R = mV/qB_2$ , что дает возможность разделять частицы в зависимости от отношения  $m/q$ . Отклоняясь от первоначального направления движения на различные углы, ионы попадают на систему коллекторов, формируя ионный сигнал для регистрации на осциллографе.

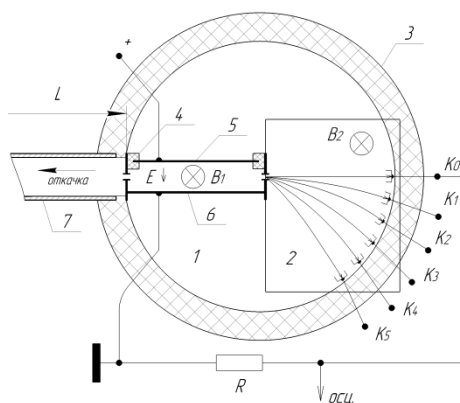


Рис. 1. Модуль корпускулярной диагностики

1 – Фильтр Вина, 2 – анализатор масс-спектрометра,  
3 – диэлектрическая вакуумная камера, 4 – изолятор, 5 –  
анод,  
6 – катод, 7 – труба к разрядной камере,  
 $K_i$  –  $i$ -й коллектор ионов,  $R = 50$  Ом

Фильтр Вина и магнитный масс-спектрометр размещены в диэлектрической вакуумной камере, которая соединяется патрубком с ионным источником, представляющим собой сильноточный (до 80 кА) искровой разряд с лазерным инициированием. Давление в разрядной системе и канале транспорта ионов должно быть не хуже  $10^{-5}$  торр.

При проектировании были приняты следующие параметры частиц: атомный вес  $2 \div 70$ , заряд  $+1...+30$ , скорость  $10^7 \div 10^9$  см/с. Расчеты показали, что шесть коллекторов – оптимальное число для регистрации быстрых ионов с зарядом  $q = 10 \div 20$  и скоростями до  $5 \times 10^8$  см/с. Коллекторы  $K_i$  ( $i = 1...5$ ) размещены равномерно в  $1/8$  части камеры. Данная система способна регистрировать ионы с ларморовскими радиусами от 7 до 27 см. Общий поток ионов, проходящий через фильтр Вина, регистрируется коллектором  $K_0$  в отсутствие магнитного поля  $B_2$ .

### Список литературы

1. Брызгунов М.И., Иванов А.В., Панасюк В.М., Пархомчук В.В., Рева В.Б., Повышение эффективности электронного коллектора для систем электронного охлаждения при помощи фильтра Вина Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 6.
2. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Лазерная масс-спектроскопия. М: Энергоатомиздат, 1985. 128 с.

## ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ЭМИССИЮ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ С ЛАЗЕРНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ

Представлены результаты исследования эмиссии многозарядных ионов из плазмы вакуумного искрового разряда с лазерным инициированием при энергиях лазерного импульса 500 и 1200 мДж. В экспериментах регистрировались масс-спектры ионов разрядной плазмы и соответствующие им токи разряда. На основе этих данных проанализировано общее количество образующихся высокозарядных ионов, их заряд и скорости.

E.D. VOVCHENKO, K.I. KOZLOVSKIY, A.P. MELEKHOV, G.S. BOGATYKH, B.U. ASROROV  
 National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF LASER PULSE ENERGY ON THE EMISSION OF MULTIPLY CHARGED IONS FROM THE PLASMA OF A VACUUM SPARK WITH LASER INITIATION

The results of a study of the emission of multiply charged ions from the plasma of a vacuum spark discharge with laser initiation at laser pulse energies of 500 and 1200 mJ are presented. In the experiments, the mass spectra of discharge plasma ions and the corresponding discharge currents were recorded. Based on these data, the total number of highly charged ions formed, their charge and velocities were analyzed.

Для разработки инжекторов многозарядных ионов важно увеличивать их выход с зарядностью выше +10. Для этого были проведены исследования сильноточного искрового разряда с накопительной емкостью 0,2 мкФ и инициированием лазерным импульсом с энергией до 1200 мДж. В экспериментах варьировалось напряжение на электродах  $U_{AK} = 8 \div 14$  кВ и энергия лазерного импульса  $E_{ЛАЗ}$ . Диагностика ионов плазмы проводилась с помощью времяпролетного масс-спектрометра с магнитным анализатором [1, 2], а разрядный ток регистрировался поясом Роговского. Фрагменты масс-спектров ионов разрядной плазмы (рис. 1) иллюстрируют уменьшение максимального заряда ионов с ростом энергии лазерного импульса.

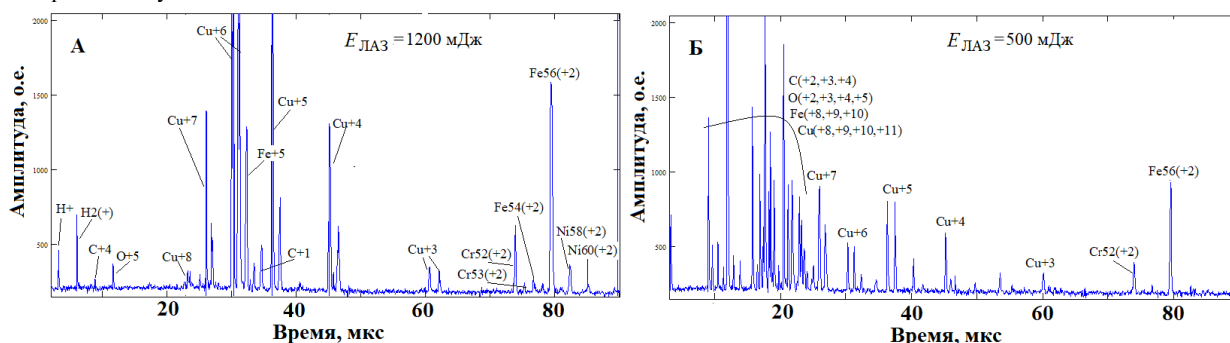


Рис. 1. Фрагменты масс-спектров ионов разрядной плазмы при  $U_{AK}=14$  кВ:  $E_{ЛАЗ} = 1200$  мДж (А) и  $E_{ЛАЗ} = 500$  мДж (Б)

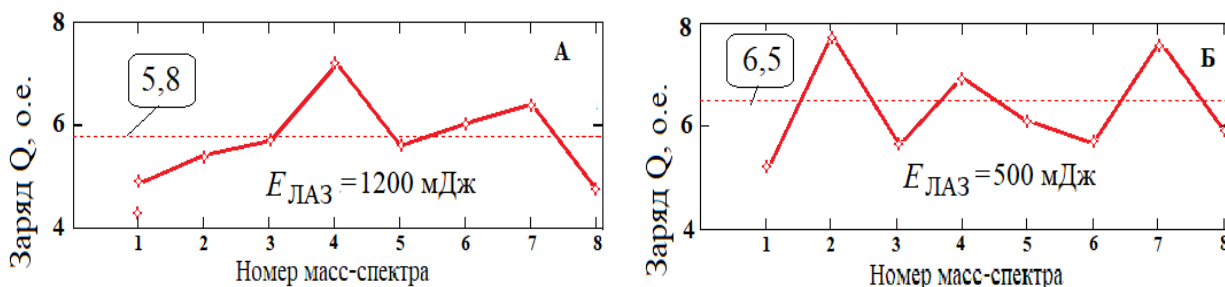


Рис. 2. Статистика величины заряда ионов разрядной плазмы при  $U_{AK}=14$  кВ:  $E_{ЛАЗ} = 1200$  мДж (А) и  $E_{ЛАЗ} = 500$  мДж (Б)

На рис. 2 приведены оценки суммарной величины заряда  $Q$  (в относительных единицах) для серий из 8 масс-спектров, полученных при энергии лазерного импульса  $E_{ЛАЗ} = 1200$  мДж и  $E_{ЛАЗ} = 500$  мДж. Видно, что величина  $Q$ , как и ожидалось, слабо зависит от величины  $E_{ЛАЗ}$ . Действительно, общее количество образующихся в разрядной плазме высокозарядных ионов в первую очередь зависит от энергии запасаемой в накопительной емкости, которая при  $U_{AK}=14$  кВ более чем на порядок превышает  $E_{ЛАЗ}$ .

### Список литературы

1. Alkhimova M A et al 2015 Nukleonika **60** 221
2. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1393/1/012108/pdf>



А.О. ХУРЧИЕВ<sup>1</sup>, А.В. СКОБЛЯКОВ<sup>1</sup>, В.А. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, А.В. КАНЦЫРЕВ<sup>1</sup>, А.А. ГОЛУБЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## КАЛИБРОВКА ДЕТЕКТОРНЫХ ПЛЕНОК IMAGING PLATES ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Детекторные пленки Imaging Plates широко используются в плазменных экспериментах для детектирования электронов, ионов и рентгеновского излучения. Количественная и качественная информация, полученная из измерений эмитирующих из плазмы частиц, позволяет как лучше понимать процессы, происходящие в плазме, так и сделать количественные оценки о параметрах плазмы. В данной работе представлены результаты абсолютной калибровки пленок IPs FujiFilm BAS-MS и BAS-TR при регистрации рентгеновского излучения и использовании сканера Durr Dental VistaScan Mini View.

A.O. KHURCHIEV<sup>1</sup>, A.V. SKOBLIAKOV<sup>1</sup>, V.A. VOLKOV<sup>1</sup>, A.V. KANTSYREV<sup>1</sup>,  
A.A. GOLUBEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

## CALIBRATION OF IMAGING PLATES DETECTORS FOR X-RAY MEASUREMENTS

Imaging Plates are widely used in plasma experiments for detection electrons, ions and X-rays. Quantitative and qualitative information obtained from measurements of particles emitting from plasma allows us to both better understand the processes occurring in the plasma and make quantitative estimates about plasma parameters. This paper presents the results of absolute calibration of IPs FujiFilm BAS-MS and BAS-TR when recording x-ray radiation and using a Durr Dental VistaScan Mini View scanner.

Информация о потоках частиц и излучения, эмитируемых сильноточными разрядами или лазерной плазмой, представляет интерес как с точки зрения исследования процессов, происходящих в плазме, так и прикладных задач. По измеренным спектрам заряженных частиц можно судить о механизмах ускорения плазмы. Регистрация рентгеновского излучения используется для построения изображения излучающей зоны плазмы и определения температуры и электронной плотности плазмы. Для регистрации рентгеновского излучения большое распространение получили пленочные детекторы Imaging Plates (IP) Fujifilm на основе фотостимулированного люминофора (BaFBr:Eu<sup>2+</sup>) [1], обладающие высоким динамическим диапазоном и хорошим пространственным разрешением.

Чувствительность пленок IP BAS-MS и BAS-TR нелинейно зависит от энергии излучения, причем абсолютные значения калибровки зависят от типа лазерного сканера, используемого для считывания с пленки зарегистрированного сигнала [2]. Сигнал детекторных пленок зависит от поглощенной энергии излучения в чувствительном слое. В работе [3] была предложена экспоненциальная модель зависимости чувствительности пленок BAS-MS, BAS-TR и BAS-SR от поглощенной энергии  $dE_{dep}$  в расчете на один фотон:

$$PSL(E) = \alpha \int_0^W \frac{dE_{dep}}{dz}(E, z) e^{-z/L} dz = \alpha dE_{dep}^{eff},$$

где  $dE_{dep}/dz$  – энергия, выделяемая падающими и всеми вторичными частицами в люминофорном слое  $dz$ ;  $W$  – толщина слоя люминофора;  $L$  – длина поглощения фотонов фотостимулированного излучения, образованных в процессе сканирования пленки. Экспоненциальный множитель в формуле учитывает ослабление потока фотонов на глубине  $z$  в люминофорном слое в процессе сканирования пленки. Коэффициент  $\alpha$  зависит от типа падающего излучения или частиц, но не зависит от энергии. Таким образом, зная коэффициент  $\alpha$ , можно рассчитать чувствительность пленки для широкого диапазона энергий излучения.

В данной работе представлены результаты калибровки пленочных детекторов IPs BAS-MS и BAS-TR для рентгеновского излучения. Калибровка проводилась с помощью радиоактивного позитронного источника Ge-68 и лазерного медицинского сканера VistaScan Mini View.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

### Список литературы

1. J. Miyahara et. al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 1986, V. 246, p. 572-578. DOI: 10.1016/0168-9002(86)90156-7.
2. K. Zeil, D. Kraft, A. Jochmann et. al., Rev. Sci. Instrum., 2010, V. 81, 013307. DOI: 10.1063/1.3284524
3. T. Bonnet, M. Comet, D. Denis-Petit et. al., Rev. Sci. Instrum., 2013, V. 84, 103510. DOI: 10.1063/1.4826084

М.В. ЧАЩИН<sup>1</sup>, П.А. ЩЕГЛОВ<sup>1</sup>, А.А. ТАУСЕНЕВ<sup>1,2</sup>, Т.А. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, М.М. НАЗАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт", Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ НАКАЧКИ В ПРОЦЕССЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследована модификация оптических спектров лазерного излучения накачки в процессе генерации ускоренных электронов МэВ-ного уровня. Установлены зависимости уширения спектров в сторону высоких частот (синий сдвиг) от параметров импульса и мишени (типа газа, давления в сопле и чирпа), а также их связь с общим зарядом электронов.

M.V. CHASCHIN<sup>1</sup>, P.A. SHCHEGLOV<sup>1</sup>, A.A. TAUSENEV<sup>1,2</sup>, T.A. SEMENOV<sup>1</sup>, M.M. NAZAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## MODIFICATION OF OPTICAL PUMP SPECTRA DURING LASER ACCELERATION OF ELECTRONS

The process of the laser pump spectra modification during generation of accelerated MeV-level electrons has been studied. The dependences of the broadening of the spectra toward high frequencies (blue shift) on the parameters of the pulse and target (type of gas, pressure in the nozzle, chirp), as well as their relationship with the total charge of the electrons, have been established.

Модификация оптических спектров видимого диапазона при распространении релятивистских ( $I > 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) лазерных импульсов в плазме является ценным источником информации о происходящих внутри процессах, что обусловлено возможностью их простой и точной регистрации в режиме реального времени. Анализ видимых спектров с другими измеряемыми сигналами обеспечивает возможность более точной настройки параметров экспериментов и понимание физики исследуемых явлений.

Экспериментальные исследования проводятся на мульти-тераваттном Ti:Sa лазерном комплексе (длительность импульсов 30 фс, энергия на мишени 150 мДж), расположенном в НИЦ «Курчатовский институт». Собранный схема, созданная для генерации ускоренных электронов релятивистскими лазерными импульсами в газокластерной мишени (использовались аргон, криптон и азот; диаметры кластеров 44 нм, 54 нм и 16 нм соответственно), позволяет также регистрировать иные вторичные типы излучения (рентгеновское, оптическое [1,2]).

Сравнение сигналов с нескольких детекторов от каждого импульса выявило связь видимых спектров оптического диапазона с потоком электронов и интегрального рентгеновского излучения (Рис. 1 б). Увеличение интенсивности в спектральном диапазоне 600-750 нм также наблюдается при изменении чирпа (и, соответственно, длительности) импульсов накачки, совпадающее с увеличением выхода электронов (Рис. 1 а). Зависимость данных сигналов от точки фокусировки и от давления газа на выходе сопла также позволяет оптимизировать передачу энергии для достижения максимального потока и температуры электронов.

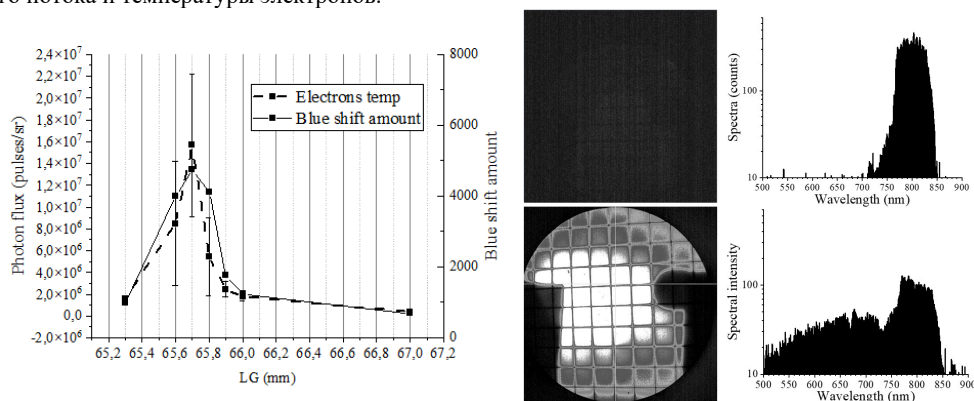


Рис. 1. а) зависимость интегрального выхода рентгена и уширения спектра накачки от растяжения лазерного импульса (расстояния между решетками компрессора); б) соответствие синего сдвига с потоком электронов при изменении чирпа импульсов накачки и процесс модификации спектра при увеличении выхода электронов (светимости люминесцентного экрана Lanex)

Форма спектров оптического диапазона также различается для различных используемых газов, при нелинейном взаимодействии с образующимися плазменными волнами и передаче энергии от лазерного импульса кильватерному полю наблюдается различная эффективность перекачки энергии из диапазона 750-850 нм в синюю область.

### Список литературы

1. Murphy C.D. et al. Evidence of photon acceleration by laser wake fields // Phys Plasmas. 2006. Vol. 13, № 3.
2. Giulietti A. et al. Space- and time-resolved observation of extreme laser frequency upshifting during ultrafast-ionization // Phys Plasmas. 2013. Vol. 20, № 8.

А.Е. ДАНИЛОВ, С.Ю. ГОЛОВКИН, В.Н. ДЕРКАЧ, Л.А. ДУШИНА, В.Н. ПУГАЧЁВА, П.В. СТАРОДУБЦЕВ, А.Ю. ВОРОНИН, Л.П. ВЫЛОМОВ  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров Нижегородской обл.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОМОГЕНИЗАЦИИ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАЛОПЛОТНЫХ СРЕД

Представлены результаты экспериментов по определению времени гомогенизации малоплотных гетерогенных материалов при их облучении импульсным лазерным излучением. Время гомогенизации определялось началом макроскопического движения материала, которое фиксировалась по изменению диаграммы направленности рассеянного неоднородным материалом излучения. Время гомогенизации определено только для импульса с интенсивностью  $11,7 \text{ ТВт/см}^2$ , оно составило  $\approx 2,5 \text{ нс}$ .

A.E. DANILOV, S.YU. GOLOVKIN, V.N. DERKACH, L.A. DUSHINA, V.N. PUGACHEVA,  
P.V. STARODUBTSEV, A.YU. VORONIN, L.P. VYLOMOV  
FSUE "RFNC - VNIIEF", Sarov Nizhny Novgorod region

## STUDY OF HOMOGENIZATION PROCESSES OF MICROSTRUCTURE LOW-DENSITY MATERIALS

The results of experiments on determining the time of homogenization of low-density heterogeneous materials under their irradiation with pulsed laser radiation are presented. The time of homogenization was conditioned by the beginning of a macroscopic movement of material, which was fixed due to the change in the pattern of radiation scattered by the heterogeneous material. The homogenization time was determined only for the pulse with an intensity of  $11.7 \text{ TW/cm}^2$ , it was  $\approx 2.5 \text{ ns}$ .

Одной из характеристик малоплотных гетерогенных материалов является время гомогенизации. В результате поглощения излучения гетерогенная среда ионизируется, осуществляет микроскопическое движение, заполняя весь объем, и переходит в состояние однородной сплошной среды без существенных флуктуаций плотности. В течение этого процесса работает механизм объемного поглощения энергии, не осуществляется макроскопическое движение вещества как целого [1].

В исследованиях использовалось лазерное излучение с формой импульса в виде трапеции с длительностью по полувысоте  $2,3 \div 3,9 \text{ нс}$ , фронтом и срезом длительностью около  $2,2 \div 3,9 \text{ нс}$  и  $1 \div 1,5 \text{ нс}$ . Интенсивность облучения варьировалась от  $1,1 \cdot 10^{12}$  до  $1,7 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ . В опытах использовались материалы с плотностью 16 и  $33 \text{ мг/см}^3$ . Диагностировалось излучение, отраженное от мишени в апертуру фокусирующего объектива и вне его, в углы до 30 градусов. Использовался фотохронографический комплекс, регистрирующий параметры рассеянного излучения с пространственным и временным разрешением.

Временная структура сигнала, в центральном пространственном сечении представлена на рис.1а и характеризуется следующими стадиями: отражение от гетерогенной структуры, объемное поглощение и восстановление гомогенного профиля плотности, отражающего излучение обратно в апертуру объектива.

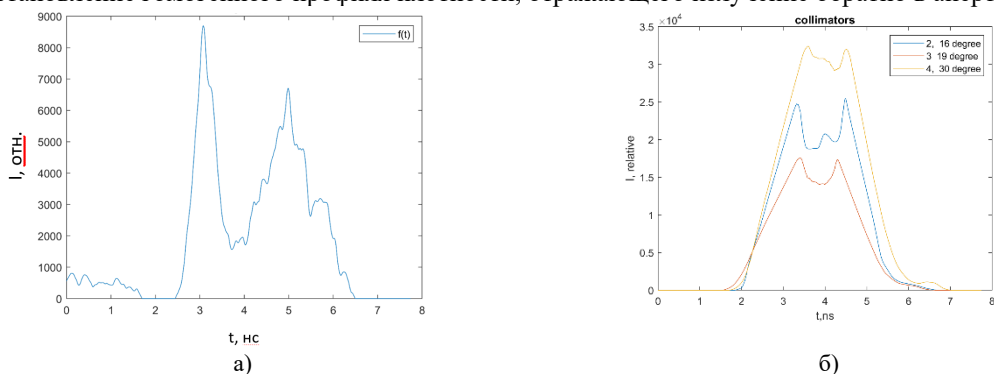


Рис.1. Динамика светимости излучения, отраженного от гетерогенной мишени в апертуру объектива (а), регистрация рассеянного излучения в углы до 30 градусов (б).

Время гомогенизации с помощью двух независимых методик регистрации (рис.1а и 1б) рассеянного излучения определено только для ЛИ с интенсивностью  $11,7 \text{ ТВт/см}^2$  и составило  $\approx 2,5 \text{ нс}$ .

### Список литературы

1. А.Э. Бугров и др. Исследование взаимодействия мощных лазерных импульсов с малоплотными пористыми средами на установке "Мишень" (1995 - 2007 гг.). Троицк, Московская обл.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2008.С. 21.

И.М. МОРДВИНЦЕВ<sup>1,3</sup>, Т.А. СЕМЕНОВ<sup>2</sup>, К.А. ИВАНОВ<sup>1,3</sup>, Р.В. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, А.В. ЛАЗАРЕВ<sup>1</sup>,  
М.С. ДЖИДЖОЕВ<sup>1</sup>, В.М. ГОРДИЕНКО<sup>1</sup>, А.Б. САВЕЛЬЕВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия

<sup>3</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ЭТАНА

Получена энергия ионов и протонов на уровне МэВ, образующихся при возбуждении кластеров CO<sub>2</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> релятивистскими лазерными импульсами. Предложена газодинамическая модель расширения реальной молекулярной газовой струи, которая позволяет рассчитывать размеры и концентрации молекулярных кластеров в коническом сопле.

I.M. MORDVINTSEV<sup>1,3</sup>, T.A. SEMENOV<sup>2</sup>, K.A. IVANOV<sup>1,3</sup>, R.V. VOLKOV<sup>1</sup>, A.V. LAZAREV<sup>1</sup>,  
M.S. DZHIDZHOEV<sup>1</sup>, V.M. GORDIENKO<sup>1</sup>, A.B. SAVEL'EV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>3</sup>Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia

## HIGH-ENERGY IONS GENERATION UNDER EXCITATION OF MOLECULAR CARBON DIOXIDE AND ETHANE CLUSTERS BY RELATIVISTIC LASER PULSES

MeV level energy ions and protons produced under excitation CO<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> clusters by relativistic laser pulses has been realized. A gas-dynamic model of the expansion of a real molecular gas jet is proposed. It makes it possible to calculate the sizes and concentrations of molecular clusters in a conical nozzle.

Ускорение высокоэнергетических ионов на данный момент особенно актуально. Компактные лазероплазменные источники ионов позволяют ускорять большие потоки частиц по сравнению с традиционными ускорителями. Кластерные мишени по сравнению с твердотельными позволяют осуществлять более эффективное вложение энергии воздействующих релятивистских фемтосекундных лазерных импульсов. Последующий взрыв кластерного ионного остова приводит к ускорению ионов до МэВ-ного уровня энергий, сопровождающийся эффективной генерацией рентгеновского излучения.

Разработана газодинамическая модель сверхзвукового расширения молекулярных (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) газов в коническом сопле, основанная на модифицированном уравнении состояния Редлиха-Квонга [1]. Произведены расчеты параметров потока (плотность, температура, скорость) в однофазном режиме.

Проверка результатов вычислений осуществлялась сопоставлением с данными обработки экспериментальных измерений Ми рассеяния. Установлено, что модельные расчеты размеров кластеров соответствуют измерениям до давлений P<sub>0</sub> = 35 и 55 бар для C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и CO<sub>2</sub>, соответственно. Дальнейшее увеличение давления газа вызывало степенной рост кластеров R ~ P<sub>0</sub><sup>n</sup> (n = 3 – 4).

Воздействие на кластеры осуществлялось излучением Ti:Sa лазерной системой (длина волны – 800 нм, энергия в импульсе – 50 мДж, длительность – 50 фс, частота повторения – 10 Гц, уровень контраста на пикосекундной временной шкале — 10<sup>-9</sup> соответственно) с релятивистской интенсивностью I ≈ 5x10<sup>18</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Регистрация ускоренных ионов проводилась с помощью Томсоновской параболы [1]. Регистрация рентгеновского спектра наноплазмы проводилась с помощью полупроводникового детектора MediPIX на чипе CdTe.

В результате оптимизации параметров молекулярных кластеров CO<sub>2</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и условий взаимодействия с лазерным пучком зарегистрированы ускоренные электроны с энергиями более 1 МэВ. Также обнаружено, что максимальные энергии и выход ионов МэВ-ного уровня достигается при среднем радиусе кластеров R = 20±5 нм. Для кластеров C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> зарегистрированы ускоренные ионы C1+, C2+ с энергиями до 1.2 МэВ (100 кэВ/нуклон) при температуре спектров T(C1+) = 170 кэВ и T(C2+) = 300 кэВ, а также протоны в диапазоне 100 – 500 кэВ. При возбуждении кластеров CO<sub>2</sub> увеличивается зарядовый состав регистрируемых ионов C1+, C2+, C3+, C4+, а также их предельная энергия 1.5 МэВ (125 кэВ/нуклон) при температуре спектров T = 130 кэВ/заряд. Наблюдались экспоненциальные спектры тормозного рентгеновского излучения до 150 кэВ с температурой T<sub>e</sub> = 22.3±0.3 и 16±0.5 кэВ для кластеров C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> и CO<sub>2</sub> соответственно. Установлено, что при одинаковых условиях лазерного релятивистского ускорения ионов из плазмы твердотельной пластиковой мишени (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)<sub>N</sub> энергии C1+, C2+, C3+, C4+ не превышают 500 кэВ (~40 кэВ/нуклон), а для протонов не более 300 кэВ.

### Список литературы

1. Lazarev A.V., Semenov T.A., Belega E.D., Gordienko V.M. // The Journal of Supercritical Fluids. 2022. Vol. 187, P. 105631.
2. Семенов Т.А., Мордвинцев И.М., Шуляпов С.А., Горлова Д.А., Лазарев А.В., Иванов К.А., Джиджоев М.С., Савельев А.Б., Гордиенко В.М.// [Оптика и спектроскопия](#), 2023. Vol. 131(2), P. 222-227.

Д.Г. ЛОСКУТНИКОВ, А.С. САВЁЛОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА И НАЛАДКА ЭНЕРГОАНАЛИЗАТОРА, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены возможности применения аддитивных технологий в производстве компактного магнитного анализатора. Проведён эксперимент и оценка полученных результатов, предложены пути устранения недостатков при выборе материалов, технологий и конструкции прибора. В общем плане работа посвящена разработке и наладке соответствующего инструментария для исследования взаимодействия с поверхностью мощных плазменных потоков, проведение экспериментов на существующих и строящихся плазменных установках МИФИ.

D.G. LOSKUTNIKOV, A.S. SAVELOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DEVELOPMENT AND COMMISSIONING OF AN ENERGY ANALYSER, USING MODERN ADDITIVE TECHNOLOGIES

The possibilities of using additive technologies in the production of a compact magnetic analyzer are considered. The experiment and evaluation of the results obtained were carried out, ways to eliminate shortcomings in the choice of materials, technologies and device design were proposed. In general, the work is devoted to the development and adjustment of appropriate tools for studying the interaction with the surface of powerful plasma flows, conducting experiments on existing and under construction plasma facilities of MEPhI.

При работе импульсных плазменных устройств: типа пинчевых, ускорителей, а также в процессе быстрых переходных процессов в термоядерных установках с магнитным удержанием, образуются и взаимодействуют с конденсированными средами мощные потоки плазмы. Исследования импульсных интенсивных электронных потоков проводятся во многих областях науки и техники, в том числе в диагностике плазмы. Характеристика электронов в плазме имеет основополагающее значение для её научного понимания.

Для изучения распределения энергии электронов плазмы разрабатываются методы и создаются магнитные анализаторы электронов. Работа спектрометра основана на принципе движения электронов по круговой орбите под действием силы Лоренца в однородном магнитном поле. Заряженная частица, влетая в область однородного поперечного магнитного поля, движется по окружности с радиусом  $R = (MV) / (q|B|) = (2ME)^{1/2} / (q|B|)$  (1), где  $M$ ,  $q$ ,  $V$ ,  $E$  – масса, заряд, скорость и энергия частицы, соответственно;  $B$  – индукция поля. Далее частица попадает на рентгеновскую плёнку-детектор. (детекторами могут быть сцинтилляционные детекторы в сочетании с ПЗС-матрицей, фотопластинки и тд). Наличие краевых эффектов, приводящих к изменению величины поля и его наклона при входе частицы в анализатор, влияет на отклонение траектории от закона движения, описываемого формулой (1). Для уменьшения влияния полей рассеяния применяется П-образный экран, расположенный на входе в энергоанализатор<sup>1</sup>, однородность поля внутри магнитной системы можно улучшить с помощью пластин из магнитомягкого материала, (Рис 1) Для получения параллельного пучка электронов на входе в Прибор применяется коллиматор в виде медной трубки  $\varnothing 2$  мм.

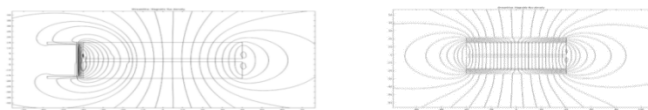


Рис. 1 Магнитное поле при наличии П-образного экрана на входе в прибор (слева) и верхней/нижней пластин

У создателей было намерение сделать Прибор, удобный в использовании, с применением 3D технологий. Материал корпуса анализатора изготовлен из алюминия (и меди) с применением лазерной сварки, съёмные картриджи для магнитов и детектора были изготовлены из металла и, как вариант, из полимера методом 3D-печати. При проведении вакуумных испытаний был выбран материал картриджа – фотополимерная смола. Для проведения экспериментов, на установке Мифи ПФМ72м на Приборе удалось достичь необходимого вакуума не хуже  $4,5 \times 10^{-2}$  Па. Результаты эксперимента зафиксированы на рентгеновской плёнке-детекторе<sup>2</sup>.

### Список литературы

1. Современные средства диагностики плазмы и их применение: Сборник тезисов докладов X Конференции. Москва, 14-16 ноября 2016 г. стр.224-226.
2. Горбунов А.А., Гулин М.А., Долгов А.Н., Николаев О.В., Савёлов А.С. Прямая регистрация потока надтепловых электронов из плазмы микропинчевого разряда. //Письма в ЖЭТФ, 1989, Т.50, в.7, с.320-322.

## **НОВООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕДИ ОБЛУЧАЕМОЙ ИОНАМИ АРГОНА ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ**

Наблюдались и исследовались микроскопические выпуклости на поверхности меди, облучаемой ионами аргона одновременно с осаждением атомов вольфрама. Описывается параллельная поверхности полость в объёме выпуклости образующаяся в области максимальной концентрации атомов вольфрама и кислорода, внедрённых в выпуклость в процессе ионного облучения. Сделано заключение о формировании выпуклостей в результате пластической модификации приповерхностного слоя под действием латеральных напряжений, инициированных ионным облучением и её развитию за счёт диффузионных потоков из соседних участков поверхностного слоя.

L.B. BEGRAMBEKOV, A.V. SIDOROV, N.I. ARTEMCHUK, A.V. ZAKHAROV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

Microscopic convexities were observed and studied on the surface of copper irradiated with argon ions simultaneously with the deposition of tungsten atoms. A cavity parallel to the surface in the volume of the convexity is described, which is formed in the region of maximum concentration of tungsten and oxygen atoms introduced into the convexity during ion irradiation. A conclusion is made about the formation of convexities because of plastic modification of the near-surface layer under the action of lateral stresses initiated by ion irradiation and its development due to diffusion flows from neighboring areas of the surface layer.

В предлагаемой работе наблюдалось модификация поверхностного слоя – развитие на облучаемой поверхности выпуклостей, об условиях образования и свойствах которых мы не нашли упоминаний в просмотренной нами литературе.

Медные образцы облучались ионами аргоновой плазмы. Плотность тока ионов на образец составляла  $1,0 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>сек, энергия ионов – 600 эВ. Одновременно с облучением на образец осаждались атомы вольфрама, распыляемые ионами плазмы с поверхности вольфрамовой мишени. Плотность тока ионов на мишень составляла  $1,5 \times 10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>сек, энергия ионов – 1,600 эВ. Образец в процессе эксперимента разогревался излучением плазмы и током облучающих ионов, и его температура повышалась от комнатной до примерно 700 К.

После 6 минут эксперимента на облучаемой поверхности фиксировались плоские выпуклости. Площадь некоторых из них достигала 1000 мкм<sup>2</sup>, высота 2-3 мкм. Поверхности выпуклостей, в целом, были параллельны поверхности, хотя высоты разных их частей варьировались в определённых пределах. В ряде случаев на выпуклостях находились поры, размеры которых в ряде случаев достигали нескольких микрон. На выпуклостях и на поверхности образцов между ними различались кристаллы (вискеры) и конусы сравнительно небольших размеров (1-3 мкм). Анализ выпуклостей выявил наличие в них вольфрама и кислорода с концентрацией, большей, чем на поверхности образца.

Сделано заключение о формировании выпуклостей в результате пластической модификации приповерхностного слоя под действием латеральных напряжений, инициированных ионным облучением и об их развитии за счёт диффузионных потоков из соседних участков поверхностного слоя. Атомы вольфрама на поверхности, способствовали увеличению напряжений в приповерхностном слое на первом этапе облучения, при сравнительно низких температурах. В то же время, внедряемые в приповерхностный слой ионов, а также атомы меди и вольфрама поверхностного слоя, проникающие в приповерхностный слой в результате столкновений с налетающими ионами, приводили к возрастанию степени аморфизации приповерхностного слоя. Это обстоятельство способствовало увеличению его пластичности при повышении температуры образца. В результате, оказывалась возможной пластическая модификация поверхностного слоя, приводящая к образованию выпуклостей. Определённую роль в этом процессе играли атомы кислорода, которые, как показано ниже, также в значительных количествах внедрялись в материал образца при взаимодействии налетающих ионов со слоем поверхностной сорбции.

Можно полагать, что наиболее ярко этот процесс проявлялся в кристаллических зёрнах, ориентация которых относительно поверхности обеспечивала наибольшую потерю энергии налетающих ионов на единице длины пробега в материале. Вместе с тем, формирование диффузионных потоков из окружающих участков поверхности, обеспечивающих развитие выпуклости, свидетельствует о том, что с началом пластической деформации уровень напряжения в приповерхностном слое уменьшается и становится меньшим, чем в окружающих участках.

В объёме выпуклости формировались параллельные поверхности полости. На дне полости фиксируются участки, содержащие преимущественно вольфрам (80-90%). В материале дна полости содержание кислорода большее, чем на поверхности и в материале выпуклости. Его концентрация достигает 22 % в некоторых характерных участках дна углублений, которые могут являться местами расположения микропузырьков кислорода до распыления выпуклости. Это позволяет полагать, что полость образовалась в области максимальной концентрации атомов вольфрама и кислорода, внедрённых в выпуклость в процессе ионного облучения.

Е.Ю. ТУЛУБАЕВ<sup>1</sup>, В.Н. КУДИЯРОВ<sup>2</sup>, И.Л. ТАЖИБАЕВА<sup>1</sup>, Ю.В. ПОНКРАТОВ<sup>1</sup>,  
Ю.Н. ГОРДИЕНКО<sup>1</sup>, В.С. БОЧКОВ<sup>1</sup>, Э. САПАРБЕК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, Курчатов  
<sup>2</sup>Томский Политехнический Университет, Томск, Российская Федерация

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОЛОВЯННО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМОЙ

Данные исследования посвящены высокотемпературным испытаниям оловянно-литиевого сплава в условиях облучения водородной плазмой. В работе подробно описана экспериментальная установка для проведения данных исследований, представлена технология изготовления исследовательского образца и методика проведения высокотемпературных испытаний оловянно-литиевого сплава в условиях воздействия водородной плазмы. В результате проведенных экспериментов получены зависимости температуры исследуемых материалов от энергии контактирующей плазмы, зависимость изменения парциального давления водорода в разрядной камере от температуры образцов, оптические спектры резонансных линий лития и олова в зависимости от температуры образца. В работе приведены данные материаловедческих исследований с образцами оловянно-литиевого сплава до и после их испытаний в условиях, моделирующих режимы работы термоядерного реактора ТЯР.

YE.YU. TULUBAYEV<sup>1</sup>, V.N. KUDIAROV<sup>2</sup>, I.L. TAZHIBAYEVA<sup>1</sup>, YU.V. PONKRATOV<sup>1</sup>,  
YU.N. GORDIENKO<sup>1</sup>, V.S. BOCHKOV<sup>1</sup>, E. SAPARBEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov  
<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation,

## HIGH TEMPERATURE TESTS OF TIN-LITHIUM ALLOY UNDER HYDROGEN PLASMA IRRADIATION

These studies are devoted to high-temperature tests of a tin-lithium alloy under hydrogen plasma irradiation. The work describes in detail the experimental installation for conducting these studies, presents the technology for manufacturing a research sample and the methodology for conducting high-temperature tests of a tin-lithium alloy under exposure to hydrogen plasma. Based on the experiments, the dependences of the temperature of test materials on the energy of contacting plasma, the dependence of the change in the partial pressure of hydrogen in the discharge chamber on the samples temperature, and the optical spectra of the resonance lines of lithium and tin depending on the temperature of the sample were obtained. The paper presents data from materials science studies with samples of tin-lithium alloy before and after their testing under conditions simulating the operating modes of a fusion reactor.

Важным направлением работ при создании новых термоядерных реакторов являются исследования в обосновании применения жидких металлов (литий, галлий, олово, индий) и сплавов в качестве обращенных к плазме материалов (ОПМ). Практически по всем параметрам (малый заряд ядра, теплофизические свойства, коррозионное взаимодействие с конструкционными материалами) литий превосходит другие легкоплавкие металлы. Исследования, проводимые на плазмо-физических установках, в большинстве случаев осуществляются с литием и литиевыми капиллярно-пористыми структурами (КПС) [1]. Результаты исследований показывают, что при температуре лития выше 500 °С идет интенсивный процесс испарения металла, который впоследствии конденсируется практически на всех внутренних поверхностях вакуумной камеры плазмо-физической установки. Поэтому было обращено внимание на сплавы с легко плавкими металлами, которые имеют низкие параметры парообразования и высокую теплоемкость. Кандидатом для создания такого сплава является олово. Металл в жидкой фазе имеет низкое значение давления насыщенного пара и поэтому сплавы олова с литием наиболее подходят для использования в ТЯР. Однако, для обоснования применимости оловянно-литиевого сплава в качестве ОПМ в ТЯР необходимо иметь верифицированные экспериментальные данные об испытаниях данного материала в условиях облучения водородной плазмой.

Настоящая работа посвящена экспериментам по испытанию оловянно-литиевого сплава в условиях облучения водородной плазмой с плотностью до  $3 \cdot 10^{17} \text{ H}^+/\text{м}^3$ . В работе описывается разработка мишеней для облучения образцов водородной плазмой, разработка технологии и процедуры изготовления образцов, разработка методики и проведение облучательных экспериментов с оловянно-литиевым сплавом. В результате проведенных экспериментов получены зависимости температуры исследуемых материалов от энергии контактирующей плазмы, зависимость изменения парциального давления водорода в разрядной камере от температуры образца, оптические спектры резонансных линий лития и олова в зависимости от температуры образца. Приведены данные материаловедческих исследований с образцом оловянно-литиевого сплава до и после его испытаний в условиях, моделирующих режимы работы ТЯР.

Работа выполняется при поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан (ИРН – BR23891779 НТП «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ»).

### Список литературы

1. Tabares F.L., Oyarzabal E., Martin-Rojo A.B., Tafalla D., de Castro A., Soletto A. Reactor plasma facing component designs based on liquid metal concepts supported in porous systems // Nuclear Fusion. – 2017.– Vol. 57.– P. 11.

Н.О. САВВИН, А.Е. ЕВСИН, И.Д. ЖДАНОВ, И.Е. КОНДРАТЬЕВ, Н.А. ПУНТАКОВ,  
А.М. ЗАХАРОВ, Л.Б. БЕГРАМБЕКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ХАРАКТЕР ИХ ОКСИДИРОВАНИЯ В ГАЗООБРАЗНОМ КИСЛОРОДЕ И В КИСЛОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ**

В работе исследуется характер оксидирования циркониевых сплавов различного состава в газообразном кислороде и в кислородной плазме. Показано, что плазменное облучение сплавов обеспечивает ускоренное воспроизведение результатов их автоклавных испытаний. Выдвинуто предположение о механизме влияния олова в циркониевом сплаве на коррозию при различном соотношении скоростей проникновения кислорода в зерна оксида циркония и сегрегации олова на границы зерен.

N.O. SAVVIN, A.E. EVSIN, I.D. ZHDANOV, I.E. KONDRATIEV, N.A. PUNTAKOV,  
A.M. ZAKHAROV, L.B. BEGRAMBEKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF ZIRCONIUM ALLOYS ON THEIR OXIDATION IN GASEOUS OXYGEN AND IN OXYGEN PLASMA**

The oxidation of zirconium alloys of different compositions in gaseous oxygen and in oxygen plasma is studied in this work. It is shown that irradiation of the alloys in plasma reproduces the results of autoclave tests at higher rate. An assumption is made about the mechanism of the influence of tin in zirconium alloy on corrosion at different ratios of the rates of oxygen penetration into zirconia grains and tin segregation at grain boundaries.

Циркониевые компоненты активной зоны легководных реакторов корродируют при взаимодействии с водным теплоносителем, что сокращает их ресурс. Активно ведется процесс разработки циркониевых сплавов повышенной коррозионной стойкости, частью которого является проведение коррозионных испытаний. Эти испытания, заключающиеся в выдержке образцов в водном автоклаве, длятся многие тысячи часов, прежде чем позволяют дать самую предварительную оценку поведения разрабатываемых сплавов в реакторе. Колоссальные временные затраты на коррозионные испытания существенно тормозят развитие циркониевых сплавов. Ранее было показано, что облучение в плазме позволяет ускорить коррозию сплава Э110 (Zr-1%Nb), по сравнению с автоклавными испытаниями, и при этом сохранить кинетику этого процесса неизменной. Целью данной работы было исследовать влияние состава циркониевого сплава на характер его оксидирования в плазме и в газовой среде.

В экспериментах использовались образцы сплавов Zr-1%Nb-0.5%Fe (сплав 1) и Zr-0.8%Nb-0.8%Sn-0.3%Fe (сплав 2), представляющие собой четвертные сегменты трубок диаметром 9.5 мм, толщиной стенки 0.6 мм и длиной 8 мм. Образцы выдерживались в кислороде при давлениях 1 атм и  $10^{-6}$  атм, а также облучались в кислородной плазме при  $10^{-6}$  атм. Эксперименты проводились в течение 5 – 300 ч при температурах от 400°C до 600°C. До и после каждого эксперимента образцы взвешивались на микровесах AND BM-20 с точностью 1 мкг для определения коррозионного привеса. Поверхности и поперечные шлифы образцов анализировались на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 с приставкой энергодисперсионного анализа INCA-xAct.

Эксперименты показали, что в кислороде атмосферного давления сплав 2 оксидируется быстрее, чем сплав 1, что согласуется с результатами автоклавных испытаний. Снижение давления кислорода до  $10^{-6}$  атм приводит к нарушению соотношения скоростей коррозии сплавов. Сплав 2 оксидируется медленнее уже на начальной (параболической) стадии кинетики оксидирования, а перелом в кинетике, после которого следует более быстрая (линейная) стадия, у сплава 2 наступает позже, чем у сплава 1. Характер оксидирования сплавов вновь меняется, если при давлении кислорода  $10^{-6}$  атм зажечь плазму. Коррозия обоих сплавов в кислородной плазме происходит быстрее, чем в газообразном кислороде, как пониженного, так и атмосферного давления. При этом соотношение скоростей коррозии сплавов и кинетика этого процесса аналогичны тому, что наблюдается при автоклавных испытаниях.

Анализ результатов экспериментов и известных моделей влияния легирующих элементов на коррозию циркониевых сплавов в автоклаве позволили выдвинуть предположение, что характер коррозии сплава 2 определяется соотношением скоростей проникновения кислорода в формирующиеся зерна оксида циркония и сегрегации олова на их границы. При интенсивном поступлении кислорода (при испытаниях в кислородной плазме или в кислороде атмосферного давления) на границах зерен  $ZrO_2$  оказывается слабоокисленное олово. Последующее его доокисление создает дополнительные, по сравнению со сплавом 1, сжимающие напряжения в оксидном слое, стабилизирующие t-ZrO<sub>2</sub>. Большая доля t-фазы в оксидном слое обеспечивает более раннее начало фазовых переходов t→m, развитие дефектной структуры в слое, наступление перелома в кинетике оксидирования и, как следствие, возрастание скорости коррозии сплава 2, по сравнению со сплавом 1. Если же поступление кислорода в сплав 2 оказывается слишком медленным (при испытаниях в газе пониженного давления), то успевающее сегрегировать на границы олово, по-видимому, препятствует транспорту кислорода в зерна оксида циркония, и они долгое время остаются недоокисленными. В результате, фазовые переходы t→m в оксидном слое этого сплава наступают позже.



Д.А. БУТНЯКОВ<sup>1</sup>, И.А. СОРОКИН<sup>1,2</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup> Фрязинский филиал государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской Академии Наук, Фрязино, Московская область, 141190, Россия

## МАСШТАБИРОВАНИЕ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА С ПЛОСКИМ ПОЛЫМ КАТОДОМ С АСИММЕТРИЧНОЙ ПОДАЧЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Разработаны и собраны распылительные системы на основе разряда с полым катодом с дополнительным напряжением смещения на мишени с различными площадями мишени вплоть до 1018 см<sup>2</sup>. Экспериментально подтверждено предположение о возможности масштабирования линейных размеров исследуемой распылительной системы в плоскости мишени без существенного изменения характеристик распылительной системы.

D.A. BUTNYAKOV<sup>1</sup>, I.A. SOROKIN<sup>1,2</sup>, D.V. KOLODKO<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup> Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics (Fryazino Branch), Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow oblast, 141190, Russia

## SCALING OF A SPUTTERING SYSTEM BASED ON AN HOLLOW CATHODE DISCHARGE WITH ASYMMETRICAL VOLTAGE SUPPLY

Sputtering systems based on a hollow cathode discharge with an additional bias voltage on target with different areas of the target up to 1018 cm<sup>2</sup> have been developed and assembled. The assumption that it is possible to scale the linear dimensions of the spray system under study in the target plane without significantly changing the characteristics of the spray system has been experimentally confirmed.

Ранее была разработана ионно-плазменная распылительная система (ИПРС) на базе разряда с полым катодом (РПК) с плоскими электродами и асимметричной подачей напряжения на электроды [1]. Электрическая схема распылительной системы представлена на рисунке 1а. Исследуемая ИПРС на основе РПК обладает рядом преимуществ [2–4], в частности, сравнимыми с магнетронными скоростями нанесения тонких пленок, равномерным распылением материала с мишени [5], отсутствием магнитного поля, что позволяет обойтись без дополнительных систем компенсации шунтирования магнитного поля с ферромагнитными мишенями. Для предлагаемой системы также характерна геометрия, позволяющая масштабировать ИПРС в двух направлениях в плоскости мишени, что экспериментально и проверялось в данной работе.



Рис. 1. а) Электрическая схема распылительной системы на основе асимметричного разряда с полым катодом: 1 – блок питания РПК, 2 блок питания смещения сеточного катода, 3 – изолированный экран, 4 – сетка (катод), 5 – анод, 6 – мишень (катод), 7 – камера вакуумного стенда; б) Сечение моделей двух экспериментальных распылительных систем в корпусах вакуумных стендов (Площади мишеней: 79 см<sup>2</sup> – слева, 1018 см<sup>2</sup> – справа; картинка в масштабе).

В работе [1] был предложен прототип распылительной системы на основе плоского полого катода с асимметричной подачей напряжения с площадью мишени 1018 мм<sup>2</sup>. В настоящей работе представлены разработанные и собранные распылительные системы, работающие по тому же принципу. Сечение моделей этих распылительных систем в масштабе представлено на рисунке 1б. Их площади мишеней: 79 см<sup>2</sup> и 1018 см<sup>2</sup>. В каждой из трех вариаций распылительной системы было обнаружено сохранение эффекта полого катода и увеличение скорости напыления при подаче дополнительного напряжения смещения на мишень. Также были посчитаны распределения скоростей напыления пленок на подложке для двух разработанных распылительных систем с помощью экспериментально верифицированной математической модели транспорта диффузией распыленного материала.

### Список литературы

1. I.A. Sorokin, D. V. Kolodko, Planar hollow cathode sputtering with asymmetrical voltage supply, *Vacuum* 207 (2023) 111570. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2022.111570>.
2. S.N. Grigoriev, Y.A. Melnik, A.S. Metel, Gas discharge source of metal vapor and fast gas atoms, *Instruments Exp. Tech.* 56 (2013) 358–364. <https://doi.org/10.1134/S0020441213030044>.
3. S. Muhl, A. Pérez, The use of hollow cathodes in deposition processes: A critical review, *Thin Solid Films* 579 (2015) 174–198. <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2015.02.066>.
4. V.I. Kolobov, A.S. Metel, Glow discharges with electrostatic confinement of fast electrons, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 48 (2015). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/23/233001>.
5. S.N. Grigoriev, A.S. Metel, M.A. Volosova, Y.A. Melnik, Deposition of wear-resistant coatings using a combined source of metal atoms and fast gas molecules, *Mech. Ind.* 16 (2015). <https://doi.org/10.1051/MECA/2015092>.

К.И. РОМАНОВ, Е.А. ШЕРШУНОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики и электроэнергетики  
Российской Академии наук (ИЭЭ РАН), Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА С МИКРОПОЛЫМ КАТОДОМ В ВОЗДУХЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Исследованы электрические характеристики разряда с микрополым катодом в воздухе при атмосферном давлении. Получена вольт-амперная зависимость разряда при различных диаметрах отверстия катода.

K.I. ROMANOV, E.A. SHERSHUNOVA

The Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian  
Academy of Sciences (IEE RAS), Moscow, Russia

## RESEARCH OF MICROHOLLOW CATHODE DISCHARGE IN AIR AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Electrical characteristics of a microhollow cathode discharge (MHCD) in air at atmospheric pressure were studied. The current-voltage dependence of the discharge was obtained for different diameters of the cathode hole.

Разряд с микрополым катодом представляет собой разновидность газового разряда, который возникает между электродами, разделенными диэлектрическим слоем с отверстием. Данный вид разряда находит применение из-за его преимуществ: малой потребляемой мощности и низкого напряжения зажигания, в таких приложениях как аналитическая химия и медицинская диагностика, например, для определения состава газовых смесей, детектирования следов веществ, анализа медицинских образцов и т.д. [1]. Учитывая относительную новизну данного разряда, его вышеперечисленные достоинства и ряд нерешенных вопросов, касающихся физики развития разряда, актуальным становится изучение характеристик этого разряда. В рамках работы было проведено экспериментальное исследование разряда с микрополым катодом в воздухе атмосферного давления.

Для изучения характеристик разряда с микрополым катодом была создана экспериментальная электрофизическая установка. Схема экспериментальной установки представлена на рис.1, а. Постоянное напряжение на нагрузке формировалась за счет применения классической схемы совмещения полумостового инвертора и умножителя напряжения [2-4]. Ток источника  $I_{sup}$  ограничивался балластным резистором  $R_b = 190$  к $\Omega$ . Напряжение на разрядном промежутке (DG) измерялось высоковольтным емкостным пробником, ток – резистивным датчиком тока (ДТ).

В ходе экспериментов были получены вольт-амперные характеристики разряда для отверстий 200, 300, 400 мкм. Зависимости тока от напряжения представлены на рис.1, в.

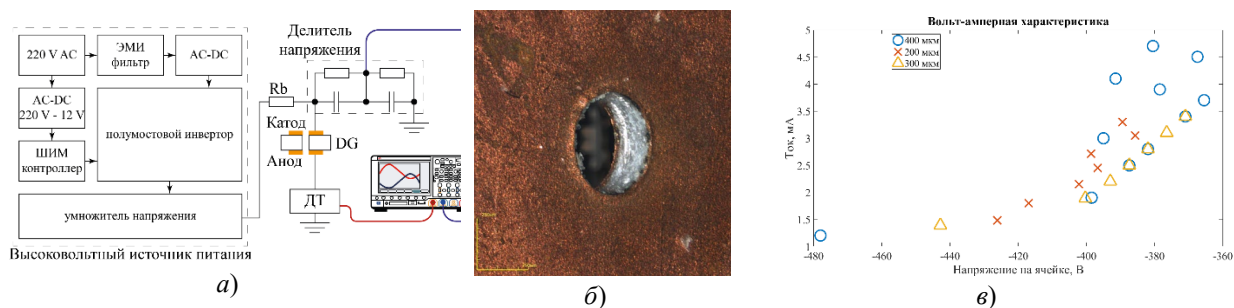


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), микрофотография отверстия катода (б) и вольт-амперная характеристика (в)

Из приведённых экспериментальных данных видно, что полученные вольт-амперные характеристики имеют линейную зависимость для всех отверстий. Наблюдается отрицательное дифференциальное сопротивление.

Работа была выполнена при поддержке Минобрнауки РФ.

### Список литературы

1. Bardos L., Barankova H. Plasma processes at atmospheric and low pressures //Vacuum. – 2008. – Т. 83. – №. 3. – С. 522-527. Bardos L., Barankova H. Plasma processes at atmospheric and low pressures //Vacuum. – 2008. – Т. 83. – №. 3. – С. 522-527.
2. Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. № 2. С. 104.
3. Мошкунов С. И., Хомич В. Ю., Шершунова Е. А. // Письма в ЖТФ. 2019. Т. 45. № 3. С. 34
4. Мошкунов С. И., Хомич В. Ю. Генераторы высоковольтных импульсов на основе составных твердотельных коммутаторов. – М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2018.

Б.В. АХРЕМЕНКОВ<sup>1</sup>, В.И. БЕРЕСТЕНКО<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>, А.О. МОРОЗОВ<sup>3</sup>

*1 - Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия*

*2 - Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

*3 - АО «НПП «Магратеп»*

## **РАЗРАБОТКА УЗЛОВОГО ДИЗАЙНА УСТРОЙСТВА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА МЕТАНА НА ОСНОВЕ СВЧ-МАГНЕТРОНА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПЛАЗМЕННОГО ФАКЕЛА МЕТОДОМ СДВИГА ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ**

Описано современное состояние исследований в области плазменного пиролиза метана и приведены основные достоинства применения СВЧ-техники для этой области. Проведена оценка реализуемости создания маломасштабного устройства по производству водорода плазменным пиролизом метана в бескислородной среде при атмосферном давлении применением СВЧ-магнетрона производства ООО «НПП «Магратеп» и сопутствующих устройств: волноводных трактов, делителей и т.д.

B.V. AKHREMEENKOV<sup>1</sup>, V.I. BERESTENKO<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>, A.O. MOROZOV<sup>3</sup>

*1 - Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS*

*2 - National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

*3 - JSC «SPE «Magratep»*

## **DESIGN DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR PLASMA CHEMICAL PYROLYSIS OF METHANE ON THE BASIS OF A MICROWAVE MAGNETRON WITH PLASMA PLUME BY WAVE FUNCTION SHIFT METHOD**

The current state of research in the field of plasma pyrolysis of methane is described and the main advantages of microwave technology application for this field are given. The feasibility of creating a small-scale device for hydrogen production by plasma pyrolysis of methane in an oxygen-free environment at atmospheric pressure through the use of microwave magnetron produced by JSC "SPE "Magratep" Ltd. and related devices, including waveguide paths, dividers, etc., is assessed.

В настоящий момент одной из проблем при производстве и потреблении водорода является отсутствие инфраструктуры, а также локализация вышеуказанных процессов по месту его применения, что формирует барьеры на пути его повсеместного использования. Одним из путей преодоления этой проблемы может выступать производство на базе существующей газовой инфраструктуры, что обеспечит локального потребителя продуктами многостадийной реакции диссоциации метана, укрупненно имеющей вид:  $\text{CH}_4 \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{C}$ .

Достоинством методов прямой диссоциации метана – основного компонента природного газа – являются: энергоёмкость процесса ниже электролиза и сопоставима с традиционными методами производства водорода (риформинг, газификация) без прямой генерации загрязняющих газов, в том числе моно- и диоксида углерода, а также возможность получения дополнительных продуктов при полной диссоциации – ацетилена, этана, углерода в его различных модификациях и т.д. Одним из методов диссоциации – плазменный пиролиз, интерес к которому увеличился, тогда как в этой группе методов особую заинтересованность представляет применение СВЧ-плазмотрона, который увеличивает влияния теплового эффекта при снижении энергии диссоциации из-за колебаний системы.

Принимая во внимание тот факт, что плазменный поток отличается низкой средней энергией свободных электронов, плотность электронов в облаке с высокой энергией низка, источники СВЧ-энергии с прерывистым разрядом не могут поставлять электроны с плотностью, достаточной для возбуждения молекул  $\text{CH}_4$  [1]. В связи с этим, на базе работ, проведенных в ФИЦ ПХФ и МХ РАН, с учётом опыта разработки установки плазмохимического синтеза в комбинации СВЧ-магнетрона мощностью 5 кВт и частотой 2,45 ГГц на базе коаксиально-волнового перехода и электродугового плазмотрона в бескислородной среде при атмосферном давлении, а также многолетнего опыта АО «НПО «Магратеп», в центре проводится разработка СВЧ-плазмотрона для диссоциации метана мощностью 50 кВт на частоте 915 МГц. Особенность разрабатываемой конструкции – применение системы делителей для создания двух когерентных электромагнитных волн со сдвигом по фазе на 90 градусов, что обеспечивает вращение суммарного электрического поля вокруг оси камеры, а также снижение периодичности колебаний системы, что приводит, с одной стороны, к формированию более стабильного значения плотности электронов внутри плазменного факела, и, с другой стороны, поддержанию стабильного термического эффекта без потери стабильности внутри системы.

С целью достижения заявленных целей на первом этапе работ реализуется поэтапное моделирование и верификация результатов на базе ПО «CST Studio» всех узлов, уточнение их габаритов, а также закладывание в конструкцию необходимых элементов устойчивости перед непростыми режимами работы. В результате моделирования была выявлена теоретическая возможность реализации разработанной концепции, на основании чего часть узлов на данный момент находится в изготовлении.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием (Рег. № НИОКТР 122112100037-4).

### *Список литературы*

1. Marco Scapinello, Evangelos Delikonstantis, Georgios D. Stefanidis, The panorama of plasma-assisted non-oxidative methane re-forming, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Volume 117, 2017, Pages 120-140, ISSN 0255-2701

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕДИЦИНЕ

Титан и нитрид титана широко используются в качестве электродов кардиостимуляторов [1] и в суперконденсаторах [2]. В обоих случаях требуется сильно развитая поверхность, обеспечивающая большую удельную ёмкость двойного электрического слоя (ДЭС) контакта с электролитом. Стоит актуальная задача развить методы эффективной обработки поверхности титана для получения биосовместимой поверхности с развитой структурой. Плазменная обработка обеспечивает формирование наноструктурной высокопористой поверхности. В работе [3] было предложено для электродов кардиостимуляторов на поверхности создать структуру типа «пух», имеющую большую удельную площадь поверхности.

В настоящей работе использованы подходы плазменной обработки металлов для получения высокопористой нано- и микроструктурной поверхности, развиваемые в НИУ «МЭИ» [3]. Эксперименты проводились на четырёх образцах из титана (Ti) марки ВТ-1. Образцы имели форму дисков диаметром 9 мм и толщиной 2 мм с изначально гладкой поверхностью. Образцы были закреплены на изолированный подвижный шток манипулятора и погружались в плазменный цилиндрический разряд установки ПЛМ-М для обработки гелиевой плазмой по заданной программе. Параметры плазменной нагрузки на поверхность образцов зависели от положения каждого образца в сечении плазменного пучка в ПЛМ-М [4, 5].

Параметры обработки поверхности образцов: энергия ионов гелия

$E = 45$  эВ (за счет смещения потенциала образцов относительно потенциала плазмы), температура электронов  $T_e = 2 \div 3$  эВ, концентрация электронов  $n_e = (2 \div 6) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ , плотность потока ионов гелия на образец  $\Gamma = (2 \div 6) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , флюенс  $\Phi = (2 \div 6) \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ .

Использовалась методика получения наноструктур типа пух на поверхности с превышением плазменной нагрузки на поверхность, при которой нановолокна образованного пуха были оплавлены для механической стабильности поверхностного слоя. В результате, плазменное воздействие привело к формированию на титановых образцах развитой наноструктурной поверхности с размером наноструктур от  $\sim 20$  нм до  $\sim 200$  нм. На рисунке 1 показано изображение наноструктуры поверхности образца 1, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

Поскольку нитрид титана показывает лучшие характеристики электродов кардиостимуляторов и суперконденсаторов, то полученная на титановом образце наноструктура азотировалась. Для этого полученная наноструктурная поверхность дополнительно была обработана по следующей методике. После плазменной обработки в гелиевой плазме образцы выдерживались в потоке азота в течение 30 минут при давлении  $(6 \div 9) \cdot 10^{-2}$  Торр и температуре образцов  $460$  °С с кратковременным ( $2 \div 3$  минуты) разрядом в азоте с током на мишень  $0,4$  А.

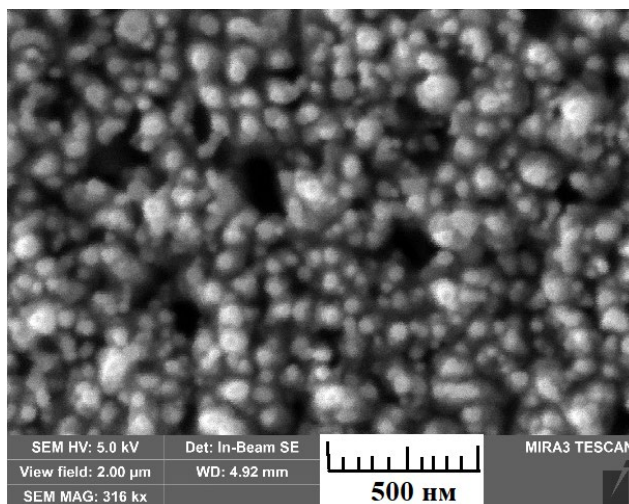


Рис. 1 – СЭМ-изображение структуры поверхности титанового образца 1 после плазменной обработки в ПЛМ-М

Состав пористой поверхности титана по результатам энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и плотность плазмы для каждого образца, измеренная с помощью двойного зонда Ленгмюра, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав (атомный, %) пористой поверхности титановых образцов после плазменной обработки в ПЛМ-М, плотность плазмы  $n_e$  в потоке на образец

	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Ti	71,0	71,4	66,8	82,3
N	20,9	19,4	17,0	12,8

О	6,8	7,38	13,0	4,2
$n_e, 10^{18} / \text{м}^3$	3	4	6	2

Проведены исследования электрических характеристик пористой поверхности титановых образцов (исходных и после плазменной обработки в ПЛМ-М) в электрохимической ячейке в НИЦ «Курчатовский институт». На образец в растворе 0,9% NaCl подавалось синусоидальное напряжение с амплитудой  $A = 1\text{В}$  и частотой  $f = 1 \div 10^5$  Гц. С помощью компьютерного осциллографа получен массив Бодэ: ток  $I(f)$ , и напряжение  $V(f)$  в зависимости от частоты  $f$ . Вычисление импеданса  $Z(f)$  ДЭС проводилось по формуле:

$$Z(f) = R_{\text{ш}} \times V_{\text{RMS1}}(f) / V_{\text{RMS2}}(f),$$

где  $R_{\text{ш}}$  – сопротивление шунта,  $V_{\text{RMS1}}$  – среднеквадратичное значение подаваемого напряжения,  $V_{\text{RMS2}}$  – среднеквадратичное значение напряжения на шунте. Вычисления ёмкости  $C(f)$  ДЭС проводилось по формуле:

$$C(f) = (|Y(f)| \sin \varphi(f)) / (2\pi f \Delta V),$$

где  $Y$  – адмитанс,  $\Delta V$  – напряжение в ДЭС. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

Электрохимические измерения импеданса и ёмкости ДЭС показали, что полученная после плазменной обработки в ПЛМ-М и последующим азотированием наноструктурная поверхность титана уменьшает импеданс и увеличивает ёмкость ДЭС. Такие результаты указывают на перспективу использования плазменной обработки для обеспечения улучшенных характеристик электродов кардиостимуляторов и суперконденсаторов.

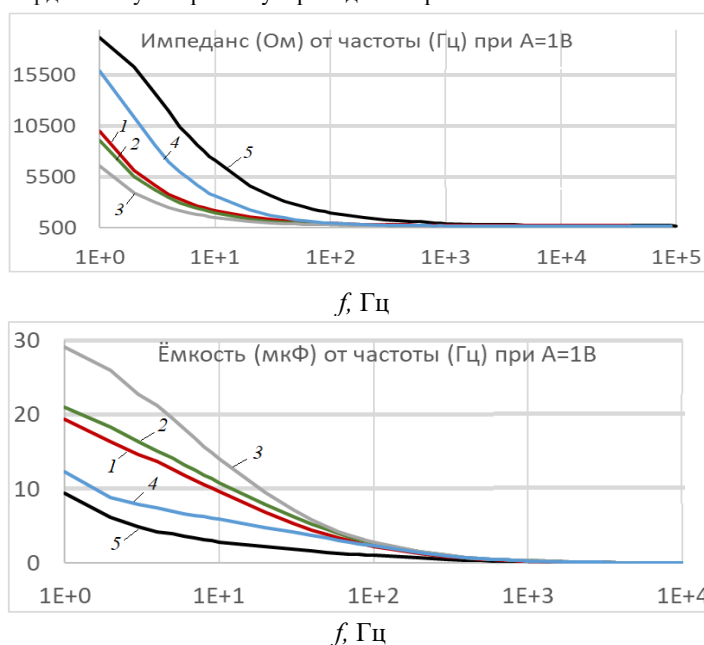


Рис. 2 – Графики зависимости импеданса и ёмкости пористой поверхности титана от частоты в электрохимической ячейке: 1,2,3,4 – номера образцов в соответствии с таблицей 1; 5 – исходный образец, не подвергавшийся обработке

Работы на ПЛМ-М выполнены при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FSWF-2023-0016.

#### Список литературы:

1. Шальдах М. Электрокардиотерапия. СПб: «Северо-Запад», 1992, 256 с.
2. Sun N., Zhou D., Liu W. et. al. Journal of Power Sources, 2021, V. 489, P. 229406.
3. Martynenko Yu. V., Budaev V. P. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1383 012027.
4. Budaev V.P., Fedorovich S.D., Dedov A.V. et. al. Fusion Eng. Des., 2020, 155, 111694.
5. Budaev V. P., Fedorovich S. D., Martynenko Yu. V, et. al. Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 9, pp. 1281–1291.

А.А. СЕРГЕЕЧЕВ, А.К. КУТУКОВ, М.А. МИЛЛЕР, В.В. ГАПОНОВА

*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия*

## **ОБРАБОТКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОТОКАМИ ПЛАЗМЫ**

Рассмотрены результаты обработки конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА импульсными потоками плазмы. Измерены микротвердость, шероховатость, толщина модифицированных слоев сталей, обработанных в широком диапазоне режимов. Произведен рентгенофазовый анализ поверхности материалов с оценкой остаточных напряжений. Определены оптимальные режимы обработки, при которых наблюдается увеличение микротвердости до 1100 HV со сглаживанием поверхности на 15%. В зависимости от режима обработки установлено наличие как растягивающих, так и сжимающих остаточных напряжений.

A.A. SERGEECHEV, A.K. KUTUKOV, M.A. MILLER, V.V. GAPONOVA

*JSC «SRC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russia*

## **TREATMENT OF STRUCTURAL STEELS WITH PULSE PLASMA FLOWS**

The results of treatment of structural steels ShKh15 and 40KhN2MA with pulsed plasma flows are considered. The microhardness, roughness, and thickness of modified layers of steels hardened in a wide range of conditions were measured. An X-ray diffraction analysis of the surface of materials was carried out with an evaluation of residual stresses. Optimal treatment modes were determined, under which an increase in microhardness to 1100 HV is observed with surface smoothing by 15%. Depending on the treatment mode, the presence of both tensile and compressive residual stresses was established.

В промышленности к ответственным изделиям предъявляются высокие требования по эксплуатационным свойствам. Одним из распространённых способов их улучшения является термическая обработка поверхности. Среди большого разнообразия методов обработки материалов выделяется обработка импульсными потоками плазмы. Отличительной особенностью метода является высокоскоростной нагрев и охлаждение поверхности материала (закалка), что приводит к образованию модифицированного слоя с повышенными эксплуатационными свойствами [1]. При этом известно, что термическая обработка может приводить к образованию остаточных напряжений [2], величину которых важно контролировать в технологическом цикле обработки.

В качестве испытуемых материалов выбраны конструкционные стали ШХ15 и 40ХН2МА. Обработка производилась на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе («КСПУ-Б») [3]. В качестве плазмообразующего газа использовался гелий. Длительность импульса составляла 1 мс. Плотность энергии, поглощаемая материалом, варьировалась в диапазоне от 20 до 100 Дж/см<sup>2</sup>, что соответствовало температурам нагрева до и выше плавления сталей. Исследование модифицированного слоя осуществлялось методом оптической и сканирующей электронной микроскопии. Методом конфокальной профилометрии измерена шероховатость образцов. С использованием рентгеновского дифрактометра произведен структурно-фазовый анализ, а также измерены остаточные напряжения методом « $\sin^2\psi$ ». Измерение микротвердости производилось методом Виккерса с нагрузкой индентора 50 г.

В ходе работы выделено несколько режимов, при которых происходят характерные изменения измеряемых параметров. Микротвердость напрямую зависела от плотности поглощенной энергии - по мере приближения к порогу плавления микротвердость изменялась от 360 до 1100 HV. В отличие от микротвердости, обработка в режимах до плавления приводила к незначительному сглаживанию поверхности - шероховатость в среднем снизилась на 15%. Измеренные остаточные напряжения находились в отрицательной области, что может быть объяснено образованием твердого мартенсита, который оказывает давление на исходную структуру.

Увеличение плотности поглощенной энергии не вносило значительного вклада в микротвердость. Достижение порога плавления приводило к увеличению шероховатости, причем на пиковых значениях плотности энергии рост составлял более чем 20 раз. Примечательно, что остаточные напряжения после закалки из расплава принимали преимущественно положительные значения. Толщина модифицированного слоя также напрямую зависела от температуры нагрева. Максимальные значения толщины для ШХ15 и 40ХН2МА составили 120 и 95 мкм соответственно.

Поверхностная закалка конструкционных сталей ШХ15 и 40ХН2МА импульсными потоками плазмы приводит к значительному улучшению ряда физико-механических характеристик. Но при этом эффективность упрочнения во многом зависит от режима обработки материалов. На основании полученных результатов сделан вывод, что обработка конструкционных сталей в режимах, не приводящих к плавлению, являются наиболее оптимальными с точки зрения комплекса свойств модифицированного слоя.

Работа выполнена в рамках комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии»: государственные контракты № Н.4ф.241.09.22.1120 от 25.08.2022, № Н.4к.241.09.23.1058 от 17.04.2023.

### *Список литературы*

1. В. А. Грибков и др. // М.: Круглый год. - 2001. - 527 с.
2. Г у л я е в А. П. // М.:Металлургия, - 1986. - 544 с.
3. Кутуков А.К. и др. // Инж. физ. – 2023. – № 10. – С. 47-58.

Д.М. БЕЗВЕРХНЯЯ, А.Т. СААКЯН, В.Н. ПУЗЫРЁВ  
ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ МИШЕНЕЙ ИЗ МЕДИ, СЕРЫ И ВОЛЬФРАМА В ДИАПАЗОНЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Представлены результаты исследований спектральных и пространственно-временных характеристик лазерной плазмы мишеней из серы, вольфрама и меди в диапазоне рентгеновского излучения. Спектры излучения плазмы мишеней из серы продемонстрировали наличие интенсивного излучения в диапазоне водяного окна.

D.M. BEZVERKHNYAYA, A.T. SAAKYAN, V.N. PUZYREV  
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## STUDY OF SPECTRAL AND SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF PLASMA OF COPPER, SULFUR AND TUNGSTEN TARGETS IN THE RANGE OF X-RAY RADIATION

The results of studies of spectral and spatiotemporal characteristics of laser plasma of sulfur, tungsten, and copper targets in the X-ray emission range are presented. The emission spectra of sulfur target plasma demonstrated the presence of intense emission in the water window range.

Актуальность данного исследования обусловлена возможностью широкого применения источников мягкого рентгеновского излучения в различных научно-прикладных направлениях [1-2]. В частности, применение мягкой рентгеновской микроскопии позволяет регистрировать изображения биологических объектов с высоким пространственным разрешением (15 – 100 нм) [3-4]. Особый интерес представляет применение излучения в диапазоне водяного и углеродного окон, комбинация результатов исследования образца в этих двух диапазонах позволит обеспечить точную и контрастную картину структуры биологических образцов. Актуальной на сегодняшний день задачей является поиск эффективного и доступного вещества в качестве мишени для создания источника излучения в отмеченных диапазонах.

Исследование проводилось на установке «Канал-2» с использованием лазера на неодимовом стекле: длина волны излучения – 1.06 мкм, ширина спектра  $\approx 42 \text{ \AA}$ , длительность импульса по полувысоте – 2.7 нс, плотность мощности в пятне фокусировки ( $\varnothing 140 \text{ мкм}$ ) варьировалась в диапазоне  $10^{12} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ .

Исследование спектральных характеристик трёх исследуемых веществ (S, W, Cu) показало, что в диапазоне водяного окна наиболее интенсивное свечение плазмы наблюдается у серы. В результате исследования были также получены изображения свечения плазмы исследуемых веществ в рентгеновском диапазоне спектра с применением алюминиевого фильтра толщиной 5 мкм. Были определены максимальные пространственные размеры излучающей области и длительность излучения плазмы. Так, на рис. 1 представлено изображение излучения плазмы серы, полученное в режиме линейной развёртки при энергии лазерного импульса 38,6 Дж.

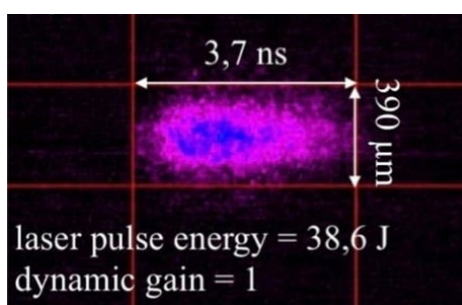


Рис. 1. Изображение свечения плазмы серы, полученное с применением алюминиевого фильтра толщиной 5 мкм в режиме линейной развёртки.

### Список литературы

1. Kotwaliwale N. et al. Non-destructive quality determination of pecans using soft X-rays //Postharvest Biology and Technology. – 2007. – V. 45. – №. 3. – P. 372-380.
2. Средин В. Г. и др. Образование поверхностных дефектов в n-Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te мягким рентгеновским излучением лазерной плазмы //Прикладная физика. – 2018. – №. 4. – С. 54.
3. Torrisi A. et al. Biological applications of short wavelength microscopy based on compact, laser-produced gas-puff plasma source //Applied Sciences. – 2020. – V. 10. – №. 23. – P. 8338.
4. Rösner B. et al. Soft x-ray microscopy with 7 nm resolution //Optica. – 2020. – V. 7. – №. 11. – P. 1602-1608.

Г.С. ЛОМОНОСОВ<sup>1</sup>, М.М. ХАРЬКОВ<sup>1</sup>, Д.В. КОЛОДКО<sup>1,2</sup>, М.С. НОВИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ТУМАРКИН<sup>1</sup>,  
А.В. КАЗИЕВ<sup>1</sup>, О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННОЙ ФРАКЦИИ ПОТОКОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНЕТРОННОГО РАЗРЯДА В СРЕДЕ СМЕСЕЙ He/D<sub>2</sub>

Проведена диагностика ионного потока из плазмы импульсного магнетронного разряда с вольфрамовой мишенью в смесях гелия и дейтерия в соотношениях 50% / 50% и 75% / 25%. Средняя мощность разряда составляла 500 Вт, а длина импульса варьировалась в диапазоне 25–500 мкс. Показано, что при длительности менее 100 мкс значительно растет доля ионов D<sup>+</sup> в потоке, а содержание ионов He<sup>+</sup> молекулярных ионов снижается.

G.S. LOMONOSOV<sup>1</sup>, M.M. KHARKOV<sup>1</sup>, D.V. KOLODKO<sup>1,2</sup>, M.S. NOVIKOV<sup>1</sup>, A.V. TUMARKIN<sup>1</sup>,

A.V. KAZIEV<sup>1</sup>, O.V. OGORODNIKOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino, Russia

## STUDY OF THE IONIC FRACTION OF PARTICLE FLUX FROM A PULSED MAGNETRON DISCHARGE PLASMA IN He/D<sub>2</sub> MIXTURES

We examined the ion fluxes from a pulsed magnetron discharge with tungsten target in helium/deuterium mixtures of 50% / 50% and 75% / 25%. Average discharge power was 500 W, and the pulse-on time was varied from 25 to 500 μs. A significant increase in D<sup>+</sup> ion flux fraction coupled with decrease in He<sup>+</sup> and molecular ions' fractions are observed for pulse durations lower than 100 μs.

В процессе работы токамака поверхности стенок и дивертора будут подвергаться воздействию интенсивных потоков частиц из плазмы. Эти потоки состоят не только из ионов компонентов топлива и продуктов реакций синтеза (He, D, T) из плазмы, но и из перепыленных частиц материала стенки и/или дивертора. Таким образом, частицы вольфрама и газа сосаждаются на стенку, что, в частности, приводит к изменению механизмов захвата удержания лёгких газов [1]. Для симуляции подобных процессов в лабораторных условиях предлагается использовать системы магнетронного распыления. В частности, для управления составом ионных потоков возможно использовать импульсный магнетронный разряд высокой мощности (HiPIMS) [2].

В настоящей работе была проведена диагностика ионного потока из гелий-дейтериевой плазмы HiPIMS разряда с теплоизолированной вольфрамовой мишенью. Потоки были измерены секторным масс-анализатором, экстрактор которого был установлен напротив рейстрекка на расстоянии 70 мм от поверхности мишени. Магнетрон работал в режиме сильноточных импульсов со средней мощностью 500 Вт и частотой повторения 500 Гц. Плотность мощности в разрядном импульсе варьировалась в диапазоне 0,05–1,33 кВт/см<sup>2</sup>. Применялись газовые смеси гелия и дейтерия в соотношениях 50% / 50% и 75% / 25%, соответственно [3]. Рабочее давление в камере 3,3·10<sup>-2</sup> Торр.

Рисунок 1 демонстрирует зависимость относительных ионных потоков на подложку от длины импульса. При длительности менее 100 мкс значительно растет доля ионов D<sup>+</sup> в потоке, а содержание ионов He<sup>+</sup> и молекулярных ионов снижается.

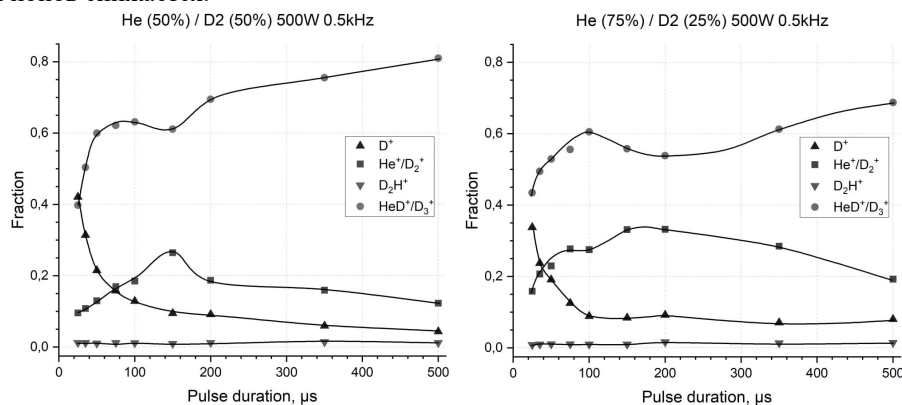


Рис. 1. Относительные потоки ионов на уровне подложки

### Список литературы

1. S.A. Krat, et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. Vol. 86, №5. P. 521-525.
2. M.M. Kharkov, et al. // High Temperature Material Processes 2023. Vol. 27, №4. P. 25-32.
3. O. V Ogorodnikova, et al. // Journal of Nuclear Materials, Vol. 558, 153328, 2022.



**Секция**  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИКИ ТВЕРДОГО**  
**ТЕЛА, ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**  
**И НАНОСИСТЕМ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н., профессор Менушенков  
Алексей Павлович

Секретарь секции – к.ф.-м.н., Кузнецов Алексей  
Владимирович

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8020  
E-mail: AVKuznetsov@mephi.ru

## ВЛИЯНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ВАКАНСИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ КРИСТАЛЛА $\text{LaF}_3$

Изучено влияние упругой деформации на механизм образования и миграции вакансий ионов фтора из объема на поверхность кристалла  $\text{LaF}_3$ . Исследования проводились методом моделирования с использованием пакета программ MOPAC-2016. Установлено, что в случае деформации растяжения/сжатия кристаллической решетки на 1-2% вероятность образования вакансий может увеличиваться на несколько порядков.

V.N. AVDIEVICH, F.R. AKHMEDZHANOV, G.S. NUZHDOV

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

## EFFECT OF ELASTIC DEFORMATION ON THE MECHANISM OF VACANCY FORMATION ON THE SURFACE OF $\text{LaF}_3$ CRYSTAL

The effect of elastic deformation on the mechanism of formation and migration of fluorine ion vacancies from the bulk to the surface of a  $\text{LaF}_3$  crystal has been studied. The studies were carried out by modeling using the MOPAC-2016 software package. It has been established that in the case of tensile/compressive deformation of the crystal lattice by 1-2%, the probability of vacancy formation can increase by several orders of magnitude.

Множество ионов фтора в суперионных кристаллах  $\text{LaF}_3$  [1] можно разбить на три подрешетки, называемые  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$ , в которых содержание ионов фтора находится в количественном отношении 12:4:2. Ионы  $F_1$  расположены между катионными плоскостями и являются наиболее подвижными. Ионы  $F_2$  смещены от базовых плоскостей, включающих катионы лантана, на расстояние  $\pm 0.046$  нм. Ионы  $F_3$  лежат в базовых плоскостях.

Для расчетов было использовано три модели решетки  $\text{LaF}_3$ . Первая модель представляла собой идеальную решетку, а во второй и третьей модели анионно-катионные плоскости раздвигались или сближались в направлении  $[010]$  на  $0.15 \text{ \AA}$  (2% от постоянной решетки  $c$ ). Изучение перемещения вакансии проводилось в области такого раздвижения или сжатия соответственно. Расчет проходил по следующей схеме - сначала один из ионов  $F_1$  переносился в междоузлие, образованное ионами  $F_2$  (дефект Френкеля). Затем на местообразованной вакансии пошагово перемещался ион фтора типа  $F_2$ , расположенный поблизости. Далее на его место перемещался ион  $F_2$ , расположенный ближе к поверхности (т.е. вакансия перемещалась в направлении  $[001]$ , через катионную плоскость). На каждом таком шаге при помощи метода PM7 [2] вычислялась полная энергия решетки. Изменение этой энергии позволяет построить профиль потенциальных барьеров, который преодолевается вакансией в том или ином случае (рис.1).

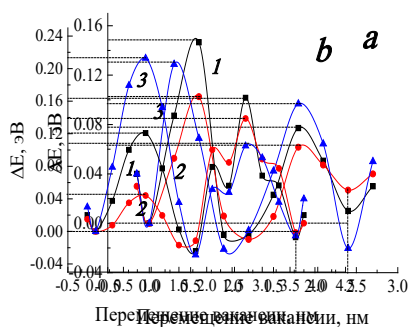


Рис. 1. Профили потенциального рельефа кристалла  $\text{LaF}_3$  при миграции вакансии из позиции  $F_1$  в позицию  $F_2$  (а) и из позиции  $F_2$  в позицию  $F_2$ , расположенного ближе к поверхности. Кривая 1 соответствует идеальной решетке, кривые 2 и 3 – растянутой и сжатой.

Расчеты показывают, что в случае растяжения энергетические барьеры уменьшаются в несколько раз. Применяя экспоненциальную форму проводимости («прыжковая модель»), можно сделать вывод, что в таком случае подвижность вакансий в направлении к поверхности возрастает на 2-3 порядка. Такой вывод имеет важное практическое применение, поскольку ионная проводимость на поверхности заметно выше, чем в объеме [3].

### Список литературы

1. Rongeat C., Anji M.R., Witter R. and others // Appl. Mater. Interfaces. 2014, Vol. 6. P. 2103–2110 DOI: 10.1021/am4052188
2. Stewart J.J. // J Mol Model. 2013 Jan. Vol. 19, №1. P. 1-32. DOI: 10.1007/s00894-012-1667-x.
3. Gulina L.B., Schikora M., Privalov A.F. and others // Appl. Magn. Resonance. 2019. Vol 50, № 4. P. 579-588. DOI:10.1007/s00723-018-1077-z

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЛАЗМОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ

В данном исследовании представлена оценка электронных и тепловых эффектов в плазмонного фотокатализе в наномасштабе. Используя самособирающиеся монослои молекул тиоловых групп для изучения взаимодействия между электронными и фототермическими явлениями, был исследован ряд условий, влияющих на фотокаталитическую эффективность: различные пространственные и временные масштабы, температуры и длины волн.

A.A. AVERKIEV, R.D. RODRIGUEZ, E.S. SHEREMET

National research Tomsk polytechnic university (TPU), Tomsk, Russia

## INVESTIGATION OF MECHANISMS OF PLASMONIC INTERACTIONS IN PHOTOCATALYTIC REACTIONS

This study presents an evaluation of electronic and thermal effects in plasmonic photocatalysis at the nanoscale. Using self-assembled monolayers of thiol group molecules to study the interaction between electronic and photo-thermal phenomena, a number of conditions affecting photocatalytic efficiency were investigated different spatial and temporal scales, temperatures and wavelengths.

Недавние достижения в области плазмонного фотокатализа открывают новые возможности для катализа энергоемких реакций с использованием солнечной энергии [1]. В данном процессе энергия фотонов, возбуждающих локализованный поверхностный плазмонный резонанс (LSPR), передается молекулам, что приводит к образованию или разрыву химических связей. Такая уникальная природа плазмонных наноматериалов делает их отличным выбором для разработки каталитических систем, которые полагаются исключительно на солнечный свет в качестве источника энергии. Однако наряду с признанными механизмами электронного возбуждения, энергия LSPR также рассеивается в виде неупругой плазмонной релаксации через электронно-фононное рассеяние, способствуя фототермическому нагреву и переносу тепла в окружающей среде [2]. Однако, в настоящее время существует проблема игнорирования влияния фототермического (плазмонного) нагрева в пользу нетепловой динамики «горячих» электронов. В настоящем исследовании данная проблема решалась методами гигантского комбинационного рассеяния света (SERS) и комбинационного рассеяния света с использованием металлического зонда (TERS), применяемыми для изучения фотокаталитического превращения нитробензенэтиола (4-NBT) в димеркаптоазобензол (DMAB).

Проведенные исследования опровергают широко распространенное утверждение о том, что плазмонный фотокатализ обусловлен исключительно нетепловой генерацией «горячих» электронов под воздействием сфокусированного источника света (лазера). Фотоны, энергия которых соответствует LSPR металлической наноструктуры, генерируют «горячие» электроны, которые инициируют переход молекул 4-NBT в DMAB. Анализ плазмонных систем золотых и серебряных наноструктур, показал, что максимальная фотокаталитическая активность далеко не всегда наблюдается при облучении светом с длиной волны, необходимой для возбуждения LSPR. Было установлено, что эффективность преобразования коррелирует с фотонной энергией, независимо от совпадения или несовпадения с LSPR.

Предполагаемое критическое влияние нетеплового электронного плазмонного распада подвергается дальнейшему сомнению, т.к. введение в систему внешнего тепла может усиливать сигнал комбинационного рассеяния, подобно резонансным эффектам комбинационного рассеяния (КР), что приводит к значительному фотокаталитическому превращению, приближаясь к 100% эффективности при температуре 200 °С. Данные наблюдения позволяют предположить, что тепловые эффекты имеют более существенную роль, чем считалось ранее, способствуя эффективности фотокатализа. Стоит отметить, что при изъятии из системы металлических структур, заменив их, например, на стеклянную подложку, одного только нагрева будет недостаточно для инициации фотокаталитического превращения 4-NBT в DMAB.

Метод TERS позволил изучить плазмонную фотокаталитическую реакцию в наномасштабе на уровне одиночных кластеров НЧ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что золотые структуры могут выступать в качестве эффективного катализатора фотореакции 4-NBT, превосходя серебряные структуры по показателю эффективности (FOM). Данное наблюдение, подтверждается динамическим характером FOM во время сканирования образцов методом TERS и исследованиями методом SERS в зависимости от времени. Полученные результаты важны для преодоления часто встречающихся проблем воспроизводимости результатов экспериментов.

Для количественного определения температуры на наноуровне в процессе плазмонного фотокатализа (плазмонного нагрева), были использованы кремниевые нанопроволоки в качестве нанотермометров, поскольку стандартные методы, такие как использование термокамеры или термометры, не подходят для точного измерения температуры в наномасштабе. Представленный метод термометрии КР использует линейную зависимость положения КР пика связи кремния в зависимости от температуры, обеспечивая точную оценку тепловых эффектов. В результате, золотые наноструктуры продемонстрировали способность достигать нагрева более 100°C, по сравнению с окружающей средой, что напрямую способствовало повышению эффективности фотокатализа.

Представленные результаты открывают новые возможности для разработки и оптимизации фотокаталитических систем, потенциально предполагая использование солнечной энергии в химических процессах.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 21-53-12045.

### Список литературы

1. X.Jiang et al. Plasmonic Active 'Hot Spots'-Confined Photocatalytic CO Reduction with High Selectivity for CH Production. *Adv. Mater.* 34, e2109330 (2022).
2. Y. Dubi, Y. Sivan, 'Hot' electrons in metallic nanostructures-non-thermal carriers or heating, *Light Sci Appl* 8, 89 (2019).

## СИНГЛЕТНОЕ УРАВНЕНИЕ ФИЗИКИ ЖИДКОСТЕЙ. УЧЁТ НЕПРИВОДИМЫХ ДИАГРАММ

Одночастичная функция распределения, задающая изменение плотности жидкости вблизи твердой поверхности, обычно описывается синглетным нелинейным интегральным уравнением. Ядро уравнения и правая часть вычисляются через бесконечный функциональный ряд неприводимых диаграмм от двухчастичной функции распределения объемной жидкости. Нами предложен алгоритм вычисления суммы данного ряда, сводящийся к последовательному решению уравнений Фредгольма и Вольтерра второго рода. Получено численное решение данных уравнений для системы твердых сфер в приближении Перкуса-Йевики.

YU.V. AGRAFONOV, I.S. PETRUSHIN, D.V. KHALAIMOV, I.V. BEZLER, R. YU. LEONTIEV  
*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

## THE SINGLET EQUATION OF FLUID PHYSICS. ACCOUNTING FOR IRREDUCIBLE DIAGRAMS

A single-particle distribution function specifying the change in the density of a liquid near a solid surface is usually described by a singlet nonlinear integral equation. The core of the equation and the right-hand side are calculated through a finite functional series of irreducible diagrams from a two-particle distribution function of a volumetric fluid. We have proposed an algorithm for calculating the sum of this series, which reduces to a sequential solution of the Fredholm and Volterra equations of the second kind. A numerical solution of these equations for a system of solid spheres in the Percus-Yevick approximation is obtained.

Основными микроскопическими характеристиками структуры граничных слоёв жидкостей являются ближний порядок и локальная плотность. Ближний порядок показывает взаимное расположение частиц друг относительно друга и описывается парной корреляционной функцией  $h_{12}(r_{12}, z_1, z_2)$ , зависящей от расстояния между центрами частиц  $r_{12}$  и удаления каждой из них от твердой поверхности  $z_1, z_2$ . Локальная плотность

$n(z_1) = \frac{N}{V} G_1(z_1)$  показывает изменение плотности вблизи поверхности, по сравнению с её объёмным значением  $\frac{N}{V}$ . Здесь  $G_1(z_1)$  - одночастичная функция распределения граничных слоёв жидкостей. Функции

$h_{12}(r_{12}, z_1, z_2)$  и  $G_1(z_1)$  находятся совместным решением интегральных уравнений Орнштейна-Цернике, ядра которых представлены бесконечными функциональными рядами неприводимых диаграмм от искомым функций. В результате получается сложная система нелинейных интегральных уравнений для функций многих переменных. Аналитическое решение такой системы уравнений не представляется возможным, а численное решение требует больших вычислительных ресурсов. Существенно уменьшить объем численных расчётов можно в синглетном приближении, заменяя парную корреляционную функцию её граничным значением вдали от поверхности  $h_{12}^{(0)}(r_{12})$  и аппроксимируя функциональные ряды простыми аналитическими выражениями. В результате получается нелинейное интегральное уравнение для функции от одной переменной  $G_1(z_1)$ , что существенно упрощает численные расчеты. Однако, методическая погрешность, обусловленная такой аппроксимацией, до сих пор остается неизвестной. Нами предлагается алгоритм оценки непосредственного вычисления суммы неприводимых диаграмм. В работах [1-2] было показано, что суммубесконечного ряда неприводимых диаграмм  $S_1(z_1)$  можно переопределить так, чтобы для модифицированной одночастичной функции  $\tilde{G}_1(z_1)$  получалось линейное интегральное уравнение Фредгольма второго рода.

В данной работе нами получено выражение для суммы  $S_1(z_1)$ , учитывающей вклад бесконечного ряда неприводимых диаграмм в модифицированную одночастичную функцию распределения  $\tilde{G}_1(z_1)$ . Показано, что  $S_1(z_1)$  удовлетворяет линейному интегральному уравнению Вольтерра второго рода. Таким образом, в синглетном приближении удаётся получить полное решение для одночастичной функции распределения  $G_1(z_1) = \tilde{G}_1(z_1) + S_1(z_1)$ , описывающей изменение локальной плотности молекулярной системы вблизи поверхности.

### Список литературы

1. Yu.V. Agrafonov, I.S. Petrushin, Using Molecular Distribution Functions to Calculate the Structural Properties of Amorphous Solids. Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 84, 783–787 (2020). DOI: <https://doi.org/10.3103/S106287382007003>
2. Yu.V. Agrafonov, I.S. Petrushin, Modification of the singlet equation for a molecular system of solid spheres near a solid surface in the Percus-Yevick approximation Journal of Physics: Conference Series 1686 (2020) 012039 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1686/1/012039

Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН, М.А. ОСИПОВ, А.С. СТАРИКОВСКИЙ,  
С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МАГНИТНЫЕ И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПОРНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ПОДШИПНИКА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТ**

Представлены результаты численного моделирования магнитных и тепловых характеристик сверхпроводящего подшипника в двух конфигурациях: аксиальной и радиальной. Расчеты проводились в диапазоне температур от 30 К до 77 К. В результате расчетов получены нагрузочные кривые для аксиальной и радиальной геометрий подшипника, а также зависимости аксиальной и вертикальной левитационных сил от температуры. Кроме того, в работе представлены зависимости осевой и радиальной сил левитации от частоты вращения при различных значениях температуры. Результаты расчетов при температуре кипения жидкого азота верифицированы путем сравнения с экспериментальными данными.

D.A. ALELSANDROV, I.V. MARTIROSIAN, M.A. OSIPOV, A.S. STARIKOVSKI, I,  
S.V. POKROVSKI, I.A. RUDNEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **MAGNETIC AND THERMAL CHARACTERISTICS OF SUPERCONDUCTING BEARING BASED ON COMPOSITE TAPES**

The results of numerical modeling of the magnetic and thermal characteristics of superconducting bearing in two configurations: axial and radial are presented. Calculations were carried out in the temperature range from 30 K to 77 K. The calculations yielded load curves for the axial and radial bearing geometries, as well as dependencies of axial and vertical levitation forces on temperature. Additionally, the study presents dependencies of axial and radial levitation forces on rotation frequency at different temperature values. The calculations' results at the boiling point of liquid nitrogen are verified by the comparing it with the experimental data.

Кинетические накопители энергии в настоящее время являются одним из перспективных решений проблемы нестабильной работы возобновляемых источников энергии. Например, эффективность генерации энергии ветряных генераторов и солнечных батарей сильно зависит от времени суток и погоды. Магнитный подшипник – это одна из ключевых компонент кинетического накопителя, обеспечивающая его беспрепятственное вращение в вакууме. С открытием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) значительная часть разрабатываемых проектов кинетических накопителей энергии включает в себя опорные подшипники на основе ВТСП композитов [1-3]. Сверхпроводящие магнитные подшипники в сравнении с подшипниками на основе постоянных магнитов обладают следующими преимуществами: высокая сила и жесткость сцепки, хорошая стабилизация. При этом в таких устройствах следует учитывать электромагнитные и тепловые эффекты, которые могут привести к переходу сверхпроводника в нормальное состояние с возможным разрушением ВТСП композита.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования магнито-силовых и тепловых характеристик двух конфигураций – аксиальная и радиальная – опорного ВТСП подшипника для кинетического накопителя энергии. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics в терминах компонент магнитного поля (H-формулировка) с учетом температурной зависимости критических характеристик сверхпроводника. Вычисления проведены в интервале температур от 30 К до 77 К. В результате расчетов получены нагрузочные кривые для аксиальной и радиальной геометрий подшипника и зависимости аксиальной и вертикальной сил левитации от температуры. Также в настоящей работе представлены зависимости аксиальной и радиальной сил левитации от частоты вращения при различных значениях температур. Нагрузочные кривые, полученные в результате численных расчетов, и частотные зависимости сил левитации верифицированы путем сравнения с экспериментальными данными, полученными при температуре кипения жидкого азота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

### *Список литературы*

1. Pang P. et al. Influence of rotor eccentricity types on the operating performance for a 100 KW HTS maglev flywheel system //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2021. – Т. 31. – №. 4. – С. 1-6.
2. Yu Z. et al. Analyses and tests of HTS bearing for flywheel energy system //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2013. – Т. 24. – №. 3. – С. 1-5.
3. MIYAZAKI Y. et al. Development of a superconducting magnetic bearing capable of supporting large loads in a flywheel energy storage system for railway application //Quarterly Report of RTRI. – 2020. – Т. 61. – №. 1. – С. 54-59.

Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, И.В. МАРТИРОСЯН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СКАНИРУЮЩЕЙ ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ ЛОРЕНЦА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Разработана методика моделирования сканирующей просвечивающей электронной микроскопии Лоренца в программе Comsol Multiphysics, которая позволяет визуализировать магнитные нано- и микроструктуры, используя как электронную плотность на поверхности детектора, так и малые углы отклонения электронов в магнитном поле этих объектов.

D.A. ALELSANDROV, I.V. MARTIROSIAN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## NUMERICAL MODEL OF LORENTZ SCANNING TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY FOR VISUALIZATION OF MICRO- AND NANOSCALE MAGNETIC STRUCTURES

A methodology for modeling Lorentz scanning transmission electron microscopy in the Comsol Multiphysics software has been developed, which allows us to visualize magnetic nano- and microstructures using both electron density on the detector surface and small angles of electron deflection in the structures' magnetic field.

Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия Лоренца (Lorentz scanning transmission electron microscopy - LSTEM) является многообещающим методом исследования наноразмерных магнитных структур. Например, в работе [1] с помощью этого метода были визуализирована скирмионная структура в монокристаллическом FeGe.

Принципиальная схема LSTEM устроена следующим образом. Электроны из электронного источника отклоняются в магнитном поле исследуемого образца и далее попадают на пиксельный детектор (pixel array detector), который измеряет угол отклонения  $\beta$ . Этот процесс повторяется для всей исследуемой области, и, тем самым, происходит сканирование магнитной структуры. В результате сканирования восстанавливается магнитная структура в образце, используя связь между углом отклонения и магнитным полем  $\beta = eBt\lambda/h$  [2], где  $e$  – это заряд электрона,  $B$  – индукция магнитного поля,  $\lambda$  – длина волны электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $t$  – толщина образца.

В разработанной численной модели сканирование симулируется одновременным испусканием большого количества равномерно распределенных невзаимодействующих электронов из круговой области с интересующим нас радиусом. Плотность электронов и угол отклонения электронов записывается на детекторе, расположенном под образцом. На рисунке 1 представлен пример одной из тестовых магнитных структур, которая представляет из себя гексагональную «решетку» со стороной  $\sim 220$  мкм. Магнитное поле в ней направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Как электронная плотность на детекторе (в центре), так и картина углов отклонения (справа) позволяет визуализировать распределение магнитного поля в образце.

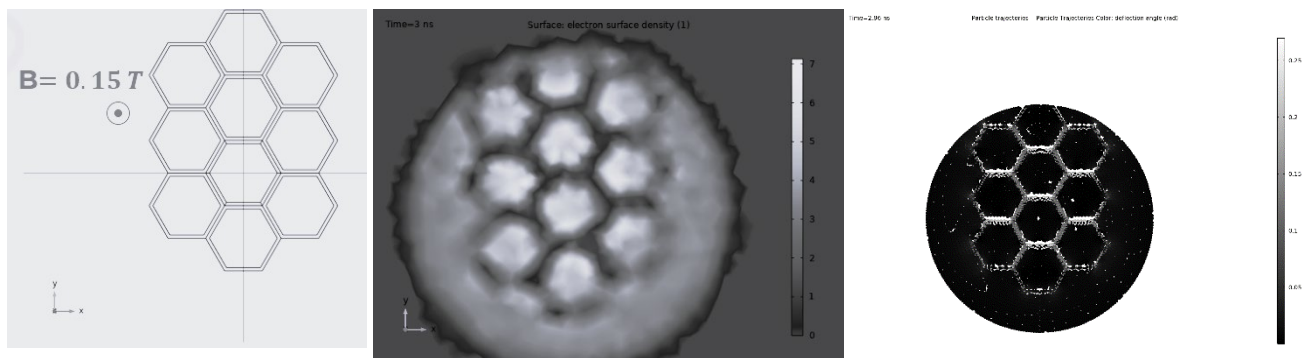


Рис. 1. Слева – схема гексагональной магнитной структуры. В центре – картина электронной плотности на детекторе. Справа – картина углов отклонения электронов.

### Список литературы

1. Chen, Z., Turgut, E., Jiang, Y. et al. Lorentz electron ptychography for imaging magnetic textures beyond the diffraction limit. *Nat. Nanotechnol.* **17**, 1165–1170 (2022).
2. Chapman, J., Batson, P., Waddell, E. & Ferrier, R. The direct determination of magnetic domain wall profiles by differential phase contrast electron microscopy. *Ultramicroscopy* **3**, 203–214 (1978).

К.Х. АШИККАЛИЕВА<sup>1</sup>, Т. В. КОНОНЕНКО<sup>1</sup>, Е.Е. АШКИНАЗИ<sup>1</sup>, Е.А. ОБРАЗЦОВА<sup>2</sup>,  
В.Г. РАЛЬЧЕНКО<sup>1</sup>, В.И. КОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

## МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ СТРУКТУРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В CVD АЛМАЗЕ

Посредством интенсивных лазерных импульсов визуализированы мелкомасштабные структурные неоднородности в объеме CVD алмаза. Обнаруженные мелкомасштабные модуляции исследованы посредством оптической и растровой электронной микроскопии. Проведено измерение профилей порогов оптического пробоя в областях кристалла, содержащих мелкомасштабные структурные модуляции. Показано, что пространственные осцилляции порога оптического пробоя коррелируют с изменением локальной концентрации примесно-вакансионных дефектов.

K.K. ASHIKKALIEVA<sup>1</sup>, T. V. KONONENKO<sup>1</sup>, E.E. ASHKINAZI<sup>1</sup>, E.A. OBRAZTSOVA<sup>2</sup>,  
V.G. RAL'CHENKO<sup>1</sup>, V.I. KONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Moscow oblast, Russia

## SMALL-SCALE STRUCTURAL INHOMOGENEITIES IN CVD DIAMOND

Small-scale structural inhomogeneities in CVD diamond were visualised by means of intense laser pulses. The detected small-scale modulations were studied using optical and scanning electron microscopy. The profiles of optical breakdown thresholds in the crystal regions containing small-scale structural modulations have been measured. It is shown that spatial oscillations of the optical breakdown thresholds correlate with changes in the local concentration of impurity-vacancy defects.

Лазерное микроструктурирование алмазных кристаллов позволяет создавать в их объеме различные структуры, такие как волноводы, заглубленные электроды, фотонные и полые микроструктуры [1], что значительно расширяет область применения передовых алмазов. Высокоинтенсивные лазерные импульсы могут вызывать оптический пробой, с последующим преобразованием алмаза в другую форму углерода – графит. В результате на поверхности или объеме алмаза формируются графитизированные области [1]. Предсказуемость и воспроизводимость процесса модификации оказывают значительное влияние на качество получаемых микроструктур. Так, процесс графитизации определяется кристаллическим совершенством кристалла, а именно содержанием дефектов, представленных в алмазе в широком спектре [2].

Недавно обнаружено, что значения порогов оптических пробоев алмазных кристаллов, синтезированных при различных условиях, могут значительно отличаться [3]. Интересно, что значения порогов пробоя могут существенно варьироваться в пределах одного и того же кристалла, выращенного при фиксированных параметрах роста (мощность СВЧ, температура подложки, расход газа и т.д.), что предполагает неоднородность его структуры. В настоящей работе обнаружено, что интенсивные лазерные импульсы позволяют визуализировать специфическую пространственную мелкомасштабную модуляцию структурных неоднородностей в CVD алмазах. Проведено измерение профилей порогов оптического пробоя в областях кристалла, содержащих такие мелкомасштабные структурные модуляции. Полученные профили сравнивались с профилями фотолуминесценции некоторых точечных дефектов. Показано, что пространственные осцилляции порога пробоя коррелируют с изменением локальной концентрации примесно-вакансионных дефектов.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект №22-22-00055).

### Список литературы

1. Ashikkaliev K. Laser-Induced Graphitization of Diamond Bulk: The State of the Art (A Review)// Phys. Wave Phenom. 2022. Vol. 30. P. 1–16.
2. Zaitsev A.M., Optical Properties of Diamond. Data Handbook (Springer-Verlag, Berlin--Heidelberg, 2001).
3. Kononenko T., Ashikkaliev K., Kononenko V., Bol'shakov A., Ral'chenko V., Konov V.// Phys. Wave Phenom. 2023. Vol. 31, №. 2. P. 59–66

## ВЛИЯНИЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА НА АКУСТООПТИЧЕСКУЮ ДОБРОТНОСТЬ В КРИСТАЛЛАХ ГЕРМАНАТА ВИСМУТА

Исследованы акустооптические свойства кристаллов силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ). Эффективные константы фотоупругости определялись акустооптическим методом Диксона. Акустооптическая добротность определялась с учетом вклада пьезоэлектрического и электрооптического эффектов. Определено направление распространения акустических волн в плоскости (110) с максимальным значением акустооптического коэффициента качества.

F.R. AKHMEDZHANOV, M.I. ELBOEVA

Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies AS RUz, Tashkent, Uzbekistan

## INFLUENCE OF PIEZO EFFECT ON ACOUSTO-OPTIC $M_2$ FACTOR OF BISMUTH GERMANATE CRYSTALS

The acousto-optical properties of bismuth silicate crystals ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) have been studied. The effective photoelasticity constants were determined by the Dixon acousto-optical method. The acousto-optical quality factor was determined taking into account the contribution of piezoelectric and electro-optical effects. The direction of propagation of acoustic waves in the (110) plane with the maximum value of the acousto-optical quality factor is determined.

Изучение фотоупругих свойств кристаллов силиката висмута ( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ ) важно для определения наиболее эффективных сечений этих кристаллов, используемых в качестве активных сред в акустооптических устройствах, а также для улучшения их параметров [1]. Нами исследована анизотропия фотоупругих свойств этих кристаллов при Брэгговской дифракции света на акустических волнах, распространяющихся в плоскости (110). При рассмотрении акустооптической добротности учитывалось влияние пьезоэффекта на фотоупругие константы кристалла. Акустооптический коэффициент качества  $M_2$ , введенный Диксоном [2] определяется выражением:

$$M_2 = \frac{n^6 p_{\text{эфф}}^2}{\rho V^3} \quad (1)$$

где  $n$  – показатель преломления света,  $\rho$  – плотность,  $V$  – скорость акустической волны,  $p_{\text{эфф}}$  – эффективная фотоупругая константа, которая определяется сверткой значений компонент тензора фотоупругости кристалла с учетом вклада пьезо- и электрооптических эффектов:

$$p_{\text{эфф}} = (p_{ijkl} - \Delta p_{ijkl}) \alpha_i \beta_j \gamma_k \kappa_l \quad (2)$$

Здесь  $p_{ijkl}$  – тензор фотоупругости,  $\Delta p_{ijkl}$  – вклад пьезоэффекта в тензор фотоупругости.  $\alpha$  и  $\beta$  – векторы поляризации падающего и дифрагированного света,  $\kappa$  и  $\gamma$  – направления распространения и поляризации акустических волн, соответственно.

Таким образом, изменяя направление волнового вектора звука, можно управлять эффективностью Брэгговской дифракции света на акустических волнах. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента  $M_2$  от направления акустического волнового вектора в плоскости (110).

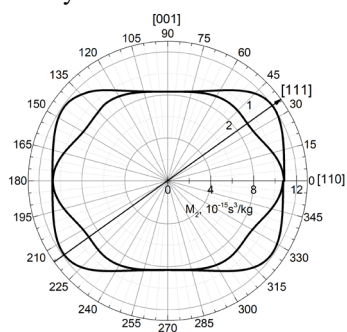


Рис. 1. Зависимость коэффициента акустооптической добротности в кристалле германата висмута от направления волнового вектора квазипродольных акустических волн в плоскости (110): без учета (1) и с учетом (2) пьезоэффекта.

Видно, что коэффициент  $M_2$  имеет максимальное значение при распространении акустических волн в направлении [110], так как отрицательный вклад пьезоэффекта в этом направлении отсутствует. При распространении акустической волны вдоль оси [111] влияние пьезоэффекта максимально и значение  $M_2$  уменьшается на 25%.

### Список литературы

1. F.R.Akhmedzhanov, M.I.Elboeva, S.Z. Mirzaev, «Exploring of Anisotropy of Acousto-Optic Interaction in Lead Molybdate Crystals» Ultrasonics 137 (2024) 107203 <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2023.107203>.
2. R.W. Dixon // Acousto-optic interaction and devices // IEEE Trans, 1980, Vol. ED-17, №1, pp. 229-235.



К.А. БОРОДАКО, Д.А. АБИН, С.В. ВЕСЕЛОВА, С.В. ПОКРОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ИНДУКТИВНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Изготовлены элементы сверхпроводящих катушек индуктивного накопителя энергии – CORC кабель и твистированная стопка, состоящая из 1-4 слоев 2G ВТСП лент (RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> промышленного производства российской компании СуперОкс. Исследованы транспортные характеристики образцов кабелей, как в исходном состоянии, так и подвергнутые деформации изгиба на диаметрах 50, 40, 23, 15, 10, 5 см (имитация намотки катушки).

K.A. BORODAKO, D.A. ABIN, S.V. VESELOVA, S.V. POKROVSKII  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## INVESTIGATION OF TRANSPORT CHARACTERISTICS OF SUPERCONDUCTING INDUCTIVE ENERGY STORAGE ELEMENTS

Elements of superconducting coils of an inductive energy storage device are manufactured - CORC cable and a twisted stack with a thickness of 1 to 4 layers of 2G HTS tapes (RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> is an industrial production of the Russian company SuperOx. The transport characteristics of cable samples both in the initial state and those subjected to bending deformation at diameters are investigated 50, 40, 23, 15, 10, 5 see (imitation of coil winding).

Индуктивный накопитель энергии служит для хранения энергии в виде магнитного поля, создаваемого электрическим током, протекающим по замкнутой электрической цепи. Электрическая цепь обычно выполняется в виде набора соленоидов. Перспективным материалом для изготовления токонесущих элементов индуктивных накопителей является сверхпроводник. Одним из главных конструктивных элементов такого накопителя является сверхпроводящая катушка [1]. Как правило, для формирования сверхпроводящих катушек, на основе промышленно выпускаемых ВТСП лент 2-ого поколения применяется сверхпроводящий кабель. Самые популярные типы сверхпроводящих кабелей: CORC кабель и твистированная стопка. CORC кабель (conductor on round core – проводник на круглом сердечнике) изготавливается путём намотки ВТСП ленты на цилиндрический формер, за счет чего получается асимметричное продольное сечение проводника. Формер является полый трубкой, а охлаждение кабеля осуществляется прокачкой жидкого хладагента по этой трубке. При намотке ВТСП ленты сверхпроводником вовнутрь, сверхпроводящий слой испытывает только деформации сжатия, поэтому диаметр трубки может быть небольшим до 2,8 мм [2], а плотность тока кабеля высокой: до 650 А/мм<sup>2</sup> в поле 12 Тл при температуре 4,2 К [3]. Твистированная стопка лент состоит из нескольких лент, которые сначала складывают вместе, а затем скручивают. Благодаря своей архитектуре и отсутствию формера кабель обладает высоким значением общей инженерной плотности тока по сравнению с другими типами кабелей аналогичного диаметра [4].

В данной работе исследованы транспортные характеристики CORC кабеля и твистированных стопок на основе 2G ВТСП лент (RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> промышленного производства российской компании СуперОкс, в которых в качестве редкоземельного элемента выступает Gd или Y. Для изготовления CORC кабеля ВТСП ленты наматывались на полые мельхиоровые трубки диаметром 5 мм с толщиной стенки 1 мм с усилием 1; 1,5; 2 кг под углом 40 и 22 градуса к оси вращения трубки-формера. Концы ленты припаивались к трубке. При намотке более одной ленты на трубку, последующие ленты укладывались одна на другую, образуя сэндвич, и также припаивались к трубке. Для изготовления твистированных стопок ВТСП ленты складывались вместе и припаивались к друг другу. Затем скручивались с шагом твистирования 40; 20; 15; 10 см. Для исследования были изготовлены CORC кабели и твистированные стопки толщиной от 1 до 4 слоев ВТСП ленты. Исследовались образцы кабелей как в исходном состоянии, так и подвергнутые деформации изгиба на диаметрах 50, 40, 23, 15, 10, 5 см (имитация намотки катушки). Измерение ВАХ проводилось 4-х контактным методом при температуре 77 К (погружение в жидкий азот).

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### *Список литературы*

1. Lieurance D. et al. Design and cost studies for small-scale superconducting magnetic energy storage (SMES) systems //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 1995. – Т. 5. – №. 2. – С. 350-353.
2. Viarengo S. et al. CORC Cables: Numerical Characterization of the Critical Current after Bending // IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2024. – Т. 34. – №. 5. – С. 1-5.
3. Weiss J. D. et al. Introduction of the next generation of CORC® wires with engineering current density exceeding 650 A mm<sup>-2</sup> at 12 T based on SuperPower's ReBCO tapes containing substrates of 25 μm thickness //Superconductor Science and Technology. – 2020. – Т. 33. – №. 4. – С. 044001.
4. Takayasu M. et al. HTS twisted stacked-tape cable conductor //Superconductor Science and Technology. – 2011. – Т. 25. – №. 1. – С. 014011.

И.Ж. БУНИН, М.В. РЯЗАНЦЕВА, И.А. ХАБАРОВА

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФИДНЫХ МИНЕРАЛОВ ЖЕЛЕЗА**

Методами растровой электронной микроскопии, потенциометрического титрования (электродный потенциал), адсорбции кислотно-основных индикаторов Гаммета из водных сред и другими методами изучен механизм влияния низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда в воздухе при атмосферном давлении на морфологию, структурные, физико-химические и технологические свойства природных сульфидных минералов железа (арсенопирита, пирита и пирротина). Установлен рациональный режим предварительной кратковременной ( $t_{обp}=30-40$  с) плазменной обработки железосодержащих сульфидных минералов, при котором происходит существенное повышение эффективности разделения пирита и арсенопирита при мономинеральной флотации: прирост извлечения пирита составил 27% при снижении выхода арсенопирита на 10–12%.

I.ZH. BUNIN, M.V. RYAZANTSEVA, I.A. KHABAROVA

*Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences (ICEMR RAS), Moscow, Russia*

## **STUDY OF THE IMPACT OF LOW-TEMPERATURE PLASMA OF DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE ON THE PHYSICAL-CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF IRON SULFIDE MINERALS**

Using the methods of scanning electron microscopy, potentiometric titration (electrode potential), Hammett's method of adsorption of acid-base indicators from aquatic media and other methods, we studied the mechanism of the influence of low temperature plasma from a dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure, on the morphology, structural, physicochemical, and the technological properties of natural iron sulfide minerals (arsenopyrite, pyrite and pyrrhotite). Rational parameters were determined for short-term ( $t_{treat}=30-40$  s) plasma pretreatment of sulfide minerals, in which the efficiency of pyrite and arsenopyrite separation in monomineral flotation increased considerably: an increase in pyrite recovery was 27% while the yield of arsenopyrite decreased by 10–12%.

В природе два из основных минералов железа и серы – арсенопирит ( $FeAsS$ ) и пирит ( $FeS_2$ ) – довольно часто встречаются вместе, и в процессах переработки золотосодержащих пиритно-арсенопиритных руд и концентратов разделение этих двух сульфидов, ассоциирующих с включениями золота микронных размеров, крайне затруднено. Пирит и арсенопирит характеризуются сходством кристаллической и электронной структуры, способности к окислению поверхности, физико-химических и технологических (флотационных) свойств. В медно-никелевых рудах многих месторождений пирротин ( $Fe_{1-x}S$ ) является преобладающим минералом, который снижает качество медного и никелевого концентратов и вызывает необходимость решения проблемы утилизации повышенного содержания диоксида серы в металлургическом переделе. Флотационная активность пирротина ниже, чем халькопирита и пентландита, и выделение минерала в отдельный продукт повышает качество никелевого концентрата. Применение электромагнитных импульсных воздействий (электроразрядных технологий) в качестве подготовительных операций, предшествующих процессу флотации, позволяет увеличить эффективность флотационного разделения сульфидных минералов с близкими физико-химическими свойствами за счет направленного (контрастного) изменения фазового состава и физико-химических свойств поверхности сульфидов.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований по повышению селективности разделения арсенопирита и пирита за счет применения в качестве подготовительной операции к процессу флотации сульфидов воздействия низкотемпературной плазмы (НТП) диэлектрического барьерного разряда (ДБР) в воздухе при стандартных условиях. Изучено влияние НТП–ДБР на морфологию (РЭМ), структурно-чувствительные свойства поверхности и электродный потенциал пирротина. Периодический барьерный разряд в пределах межэлектродного промежутка плоской геометрии и длиной 5 мм инициировали высоковольтными импульсами с фронтом  $\sim 300$  нс, длительностью  $\sim 10$  мкс, амплитудой напряжения  $U_A \approx 20$  кВ; частота следования импульсов 16 кГц.

Методом адсорбции кислотно-основных индикаторов Гаммета установлено, что в результате плазменной обработки происходит усиление акцепторных и снижение электронодонорных свойств поверхности пирита, а также уменьшение акцепторной способности арсенопирита. Отмечен рост сорбционной способности пирита по отношению к электронодонорному бутиловому кантогенату и, как следствие, повышение флотационной активности минерала. В случае арсенопирита наблюдалось снижение сорбционной и флотационной активности. Установлен рациональный режим предварительной кратковременной ( $t_{обp}=30-40$  с) плазменной обработки сульфидов, при котором происходило существенное повышение эффективности разделения пирита и арсенопирита при мономинеральной флотации: прирост извлечения пирита составил 27% при снижении выхода арсенопирита на 10–12%.

Сорбционные свойства минералов определяются энергетическим состоянием поверхности. В результате кратковременной ( $t_{обp}=10$  с) обработки НТП–ДБР образцов пирротина происходило повышение (сдвиг) электродного потенциала минерала в области отрицательных значений ( $E=-60$  мВ, в диапазоне pH 9.7–12), что предопределяет эффект снижения его сорбционной и флотационной активности.

С.В. ВЕСЕЛОВА, И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, С.В. ПОКРОВСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТОК СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ГЕНЕРАТОРА НА ПОТЕРИ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Разработана установка для измерения потерь в сверхпроводящих композитных катушках различных конфигураций на основе ВТСП лент второго поколения. Проведены экспериментальные исследования образцов с различными частотами и амплитудами тока. Получены зависимости потерь от частоты и амплитуды для таких элементов генератора, как рейстрекковая катушка и катушка замкнутой обмотки.

S.V. VESELOVA, I.V. MARTIROSIAN, D.A. ALEKSANDROV, S.V. POKROVSKII  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **INFLUENCE OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF SUPERCONDUCTING GENERATOR WINDINGS ON AC LOSSES**

An installation has been developed for measuring losses in superconducting composite coils of various configurations based on second-generation HTS tapes. Experimental studies of samples with different frequencies and current amplitudes were carried out. The dependences of losses on frequency and amplitude were obtained for such generator elements as a racetrack coil and a closed-loop coil.

Современные энергетические системы и установки, а также транспорт нуждаются в постоянном бесперебойном питании, обеспечить которое способны электрические генераторы энергии. Они обладают некоторыми ключевыми характеристиками, усовершенствование которых приводит к оптимизации электрооборудования. К ним относятся мощность, эффективность, а также габариты и вес оборудования. Один из способов улучшения этих характеристик генераторов – замена традиционных медных обмоток на сверхпроводящие (СП) элементы [1-3]. В качестве материала обмотки использовалась высокотемпературная сверхпроводящая (ВТСП) композитная лента второго поколения на основе REBCO, где RE – это редкоземельный металл. Для проведения эксперимента были выбраны конфигурации обмоток с различной геометрией расположения сверхпроводника, такие как: рейстрек (намотанным методом двойной галеты) и катушка замкнутого цикла.

В процессе работы этих элементов на переменном токе возникают энергетические потери и джоулев нагрев сверхпроводника, что может привести к перегреву и снижению токонесущей способности элемента. Для оценки потерь при переменном токе были проведены исследования с различной частотой (от 50 Гц до 1033 Гц) и амплитудой транспортного тока от 10% до 90% от критической плотности тока  $J_c$ .

Из полученных в ходе исследования данных можно сделать вывод о том, что потери на замкнутых ВТСП обмотках выше, чем на рейстрековых катушках. Распределение магнитного поля существенно отличается у разных видов СП элементов, что связано с геометрической формой. Центр симметрии обмотки рейстрекового типа находится на центральной линии образца, таким образом, поле распределяется равномерно над всей поверхностью, в то время как в замкнутой ВТСП обмотке возникают концентраторы поля с большим градиентом, возникающие из-за асимметричного расположения диаметрально расположенных витков относительно плоскости над поверхностью образца. Это приводит к локальному нагреву ленты и, как следствие, возникновению потерь. Теоретическая расчетная модель показала схожую с экспериментальными данными тенденцию.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### *Список литературы*

1. Haran K. S. et al. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap //Superconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 30. – №. 12. – С. 123002.
2. Sivasubramaniam K. et al. Development of a high-speed HTS generator for airborne applications //IEEE Transactions on applied superconductivity. – 2009. – Т. 19. – №. 3. – С. 1656-1661.
3. Dezhin D. S. et al. Design and testing of 200 kW synchronous motor with 2G HTS field coils //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2017. – Т. 87. – №. 3. – С. 032007.

## НЕУПРУГОЕ ПОЛЯРИТОН-ПОЛЯРИТОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В РУБИНЕ

Сообщается о наблюдении неупругого поляритон-поляритонного взаимодействия  $\gamma\gamma \rightarrow a$  с формированием аксиноподобного биполяритона *a* при возбуждении кристаллического рубина  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  интенсивным лазерным источником.

V.V.VOLKOVA, V.V.FILATOV

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## INELASTIC POLARITON-POLARITON INTERACTION IN RUBY

The paper reports observation of inelastic polariton-polariton interaction  $\gamma\gamma \rightarrow a$  with an axion-like bipolariton *a* in a crystalline ruby  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  under intense laser excitation.

Кристаллический рубин  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$  – трёхуровневая лазерная среда, характеризующаяся расщеплённостью метастабильного «лазерного» уровня  ${}^2E$  на два близкорасположенных подуровня ( $\bar{E}$  и  $2\bar{A}$ ), спектральный зазор между которыми составляет достаточно малую величину (порядка доли процента от энергии самого уровня  ${}^2E$ , рис. 1).

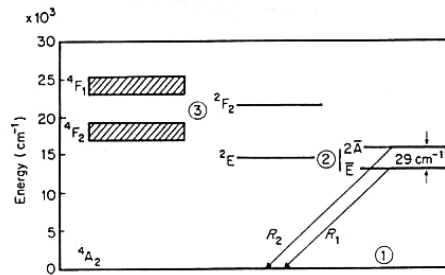


Рис. 1. Схема электронных уровней в рубине:  ${}^4A_2$  – основное состояние оптического электрона,  ${}^4F_1$  и  ${}^4F_2$  – фиолетовая и зелёная полосы поглощения, используемые в накачке,  ${}^2E = \bar{E} + 2\bar{A}$  – двоякий метастабильный уровень, переходы  $R_1$  и  $R_2$  с которого в основное состояние  ${}^4A_2$  дают лазерную генерацию на длинах волн  $\lambda_1 = 694,3$  нм и  $\lambda_2 = 692,8$  нм

Как следует из представленной на рис.1 диаграмме энергетических уровней рубина, интенсивное оптическое возбуждение кристалла позволяет забросить оптические электроны в одну из полос ( ${}^4F_1$  или  ${}^4F_2$ ) непрерывного спектра, откуда они безызлучательным образом (с испусканием инфракрасного фона) постепенно переходят на метастабильный уровень  ${}^2E$ , заполняя оба его подуровня  $\bar{E}$  и  $2\bar{A}$ . Заполненные электронами подуровни взаимодействуют между собой штарковским образом, что приводит к их дополнительному сверхтонкому расщеплению, сопровождающемуся кроссовером внутренних «сверхтонких» подветвей. При этом расщеплённый поляритонный дублет ( $R_1, R_2$ ), соответствующий электронному ( $\bar{E}, 2\bar{A}$ ), «схлопывается» на линии промежуточного (между  $R_1$  и  $R_2$ ) унитарного поляритона (для которого материальная среда по своим оптическим характеристикам идентична вакууму), открывая возможности для осуществления неупругих двухполяритонных процессов типа  $\gamma\gamma \rightarrow a$ , где *a* – аксиноподобное «тёмное» биполяритонное состояние («поляритонная молекула»). На языке гриновского формализма данный процесс может быть описан запаздывающей двухчастичной функцией Грина

$$D_a^R(k, \omega) = (\omega - \omega_a(k))^{-1} - (\omega + \omega_a(k))^{-1},$$

в которой дисперсия биполяритонов  $\omega_a = \omega_a(k)$  представляется кляйн-гордон-фоковским образом

$$\omega_a^2(k) = \omega_{0a}^2 + c^2k^2,$$

а фактор двухчастичного взаимодействия  $g_k$  может быть записан в виде

$$|g_k|^2 = \frac{1}{2} (\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \omega_a(k),$$

где  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_\infty$  суть величины диэлектрической проницаемости среды на низких ( $\omega \rightarrow 0$ ) и высоких ( $\omega \rightarrow \infty$ ) частотах, соответственно, а  $\omega_{0a}$  – «хамелеонная» (нефиксированная) масса биполяритона (в единицах  $\hbar/c^2$ ), определяемая только лишь сохранением энергии. Образование подобных аксиноподобных частиц может быть обнаружено по появлению в диэлектрической функции вещества  $\epsilon(\omega)$  дополнительного «биполяритонного» слагаемого

$$\epsilon_a(k, \omega) = \epsilon_\infty - |g_k|^2 D_a^R(k, \omega),$$

отвечающего «чистым» биполяритонным состояниям, что позволяет обнаружить последние в спектрах вторичного излучения образца по характерному пику. В рубине указанный пик наблюдался на длине волны  $\lambda = 532,5$  нм при возбуждении кристалла мощным азотным лазером ( $\lambda = 337$  нм) при охлаждении образца жидким азотом ( $T=77$  К). При комнатных температурах пик отсутствовал, что указывает на жёсткие условия синхронизма неупругого поляритон-поляритонного взаимодействия.

## БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНДЕНСАЦИЯ УНИТАРНЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ГЛОБУЛЯРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ОПАЛОВ

Исследована возможность бозе-эйнштейновской конденсации унитарных поляритонов в глобулярных фотонных кристаллах со структурой опала. Обнаружены благоприятные условия для получения конденсата в точке  $L$  первой зоны Бриллюэна.

V.V.VOLKOVA, D.A.GAVRILOVETS, A.D.KOTOVA, V.V.FILATOV  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## BOSE-EINSTEIN CONDENSATION FOR UNITARY POLARITONS IN OPAL-LIKE GLOBULAR PHOTONIC CRYSTALS

The paper investigates possibilities for Bose-Einstein condensation of unitary polaritons in opal-like globular photonic crystals. The good opportunities were found at point  $L$  of the Brillouin zone.

Унитарные поляритоны – кванты электромагнитного поля в веществе, для которых взаимодействие с фононной подсистемой приводит к эффективному «вакуумному» значению оптической плотности материала:  $n = 1$ . Интерес изучения унитарных поляритонов обусловлен не только практическими потребностями «просветления» диэлектрических сред, но также возможностями воспроизведения вакуумных эффектов (таких как, например, [1], [2]) в твёрдом теле с учётом возможности стимуляции процессов при помощи высокой плотности оптических состояний [3].

В данной работе исследуется возможность получения резонансной плотности состояний унитарных поляритонов за счёт их бозе-эйнштейновской конденсации в глобулярном фотонном кристалле (ГФК) – искусственном оптическом метаматериале со структурой опала, представленной монодисперсными глобулами (шариками) аморфного кремнезёма ( $\text{SiO}_2$ ), уложенными в правильную гранецентрированную кубическую (ГЦК) решётку. Синтетический процесс позволяет получать глобулы любого требуемого диаметра (обычно  $\sim 10^2$  нм), а наличие решёточных пустот (пор) открывает возможности введения в ГФК-матрицу различных легирующих агентов.

Результаты моделирования поляритонных спектров допированных ГФК (см. рис. 1) демонстрируют возможность получения бозе-конденсата унитарных поляритонов на границе первой зоны Бриллюэна, где скорость поляритонов  $d\omega/dk$  обращается в нуль, а плотность поляритонных состояний резонанса:

$$\rho(\omega) = [V/(2\pi)^3] \times \int dS_k / |\nabla_k \omega| = (V/2\pi^2) \times k^2 \times |d\omega/dk|^{-1} = (d\omega/dk = 0) = \infty.$$

Так, на рис 1 представлены две выявленные возможности для получения бозе-конденсации унитарных поляритонов: (а) на собственной поляритонной ветви фотонного кристалла или (б) на примесном уровне. В обоих случаях унитарные поляритоны бозе-конденсируются в точке  $L$  первой зоны Бриллюэна.



Рис. 1. Поляритонные спектры ГФК на основе искусственных опалов: (а) кристалл с диаметром глобул  $D = 250$  нм, заполненный модельной средой с показателем преломления  $n = 7$ ; (б) образец с  $D = 400$  нм, легированный «резонансной» примесью ( $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ) в запрещённой фотонной зоне композита [4]. Сплошные линии соответствуют поляритонным ветвям  $\omega = \omega(k)$ , пунктиром показан закон дисперсии света в вакууме  $\omega = c \times k$ , пересечение  $U$  – точка унитарных поляритонов

### Список литературы

1. ATLAS Collaboration // Nature Physics, 13, 852-858 (2017).
2. Moiseeva V.A., Filatov V.V. // viXra: 2305.0027.
3. Dashchinskii A.A., Korets D.A., Filatov V.V. // viXra: 2401.0145.
4. Gorelik V.S. et al. // Inorganic Materials, 49(7), 685-691 (2013).

Ю.А. ВЫПРИЦКАЯ, А. Д. ЧЕРТОВА, Ф.И. ЧУДАРИН,  
Е.И. ПАЦЕРА, Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ  
*Национальный исследовательский технологический университет МИСИС, Москва, Россия*

## ПОЛУЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ HIPIMS ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИШЕНИ ИЗ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА $(\text{Mo}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2})\text{SiB}$

Покрытия  $(\text{Mo,Ta,Nb,Zr,Hf})\text{SiB}$  были получены методом HIPIMS при варьировании расхода аргона от 25 до 125 мл/мин. Изучены состав, структура, механические характеристики и жаростойкость покрытий. Результаты показали, что при увеличении расхода Ar с 25 до 125 мл/мин скорость роста покрытий возрастала в 2,5 раза. Покрытия характеризовались твёрдостью 14-15 ГПа, модулем упругости 178-196 ГПа и упругим восстановлением 34-40%. Лучшей стойкостью к окислению при температурах 1100 и 1300°C обладало покрытие, полученное при расходе Ar 25 мл/мин. Защитные свойства покрытия обеспечивались формированием оксидной плёнки на основе Si:B:O с кристаллитами фаз t-HfSiO<sub>4</sub>, m-HfO<sub>2</sub>, m-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, t-ZrO<sub>2</sub>.

Y.A. VYPRITSKAYA, A.D. CHERTOVA, F.I. CHUDARIN, E. I. PATSERA,  
E.A. LEVASHOV, PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV  
*National Research Technological University MISIS, Moscow, Russia*

## DEPOSITION OF PROTECTIVE COATINGS BY HIPIMS METHOD USING A TARGET FROM HIGH ENTROPY ALLOY OF $(\text{Mo}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2})\text{SiB}$

The  $(\text{Mo,Ta,Nb,Zr,Hf})\text{SiB}$  coatings were deposited by HIPIMS method by varying the argon flow rate from 25 to 125 ml/min. The composition, structure, mechanical characteristics and oxidation resistance of coatings have been studied. The results showed that when the Ar flow rate increased from 25 to 125 ml/min, the growth rate of the coatings increased by 2.5 times. The coatings were characterized by a hardness of 14-15 GPa, an elastic modulus of 178-196 GPa and an elastic recovery of 34-40%. The coating obtained at 25 ml/min Ar had the best oxidation resistance at temperatures of 1100 and 1300°C. The protective properties of the coating were ensured by the formation of an oxide film based on Si:B:O with crystallites of the t-HfSiO<sub>4</sub>, m-HfO<sub>2</sub>, m-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, t-ZrO<sub>2</sub> phases.

Важным является повышение стойкости к высокотемпературному окислению, прочности и износостойкости ответственных компонентов современной техники за счёт нанесения защитных покрытий. Многообещающими с точки зрения механических свойств и жаростойкими являются высокоэнтропийные сплавы на основе тугоплавких металлов, обладающие высокими удельной прочностью 405-506 МПа, жаростойкостью в диапазоне температур 1200-1400°C, износостойкостью, высокими теплопроводностью и теплозащитными свойствами, а также соединения на их основе [1].

Данная работа посвящена исследованию влияния расхода рабочего газа Ar на структуру и свойства покрытий  $(\text{Mo,Ta,Nb,Zr,Hf})\text{SiB}$ , полученных методом высокоомощного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS).

Покрытия в системе  $(\text{Mo,Ta,Nb,Zr,Hf})\text{SiB}$  были получены методом HIPIMS с использованием катода-мишени с составом реакционной смеси: 35 ат.%  $(\text{Mo}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Hf}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2})$  + 60 ат.% Si + 5 ат.% В. Мишень была получена с использованием технологий самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и горячего прессования. Осаждение покрытий проводилось в вакуумной установке на базе откачивающей системы УВН-2М. Расход газа Ar составлял 25, 75 и 125 мл/мин. Структура, элементный и фазовый состав покрытий были изучены с помощью растрового электронного микроскопа S-3400N Hitachi, оснащённого приставкой Noran-7 Thermo для энергодисперсионной спектроскопии, и рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра D2 Phaser Bruker. Состав покрытий был определён методом оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда на приборе Profiler 2 Horiba JY. Механические свойства покрытий: твёрдость, модуль упругости, величина упругого восстановления определялись методом наноиндентирования. Для оценки кинетики окисления были проведены ступенчатые отжиги в электропечи SNOL 7,2/1200 UMEGA при температуре 1000°C и выдержках 10-180 мин. Высокотемпературные отжиги проводились при температурах 1100, 1300 и 1500°C с использованием муфельной печи ТК 15.1800.ДМ.1Ф (ООО «Термокерамика»).

Результаты показали, что в исходном состоянии покрытия HIPIMS являлись рентгеноаморфными и характеризовались однородной структурой с равномерным распределением элементов по толщине. Толщины покрытий, полученных при расходе Ar 25, 75 и 125 мл/мин, составили 3,8, 7,4 и 9,5 мкм соответственно. Скорость роста покрытий возрастала в 2,5 раза с увеличением расхода Ar с 25 до 125 мл/мин, что может быть связано с увеличением пиковой мощности с 33 кВт до 59 кВт. Все покрытия обладали близкими значениями твёрдости (14-15 ГПа), модуля упругости (178-196 ГПа) и упругого восстановления (34-40%). Исследование кинетики окисления показало, что лучшей жаростойкостью в условиях ступенчатого отжига при 1000°C характеризовались покрытия, полученные при расходе Ar 25 и 75 мл/мин. Неизотермические отжиги показали, что все покрытия обладали высокой стойкостью к окислению при температуре 1100°C. Лучшей стойкостью к окислению при температуре 1300°C обладало покрытие, полученное при расходе Ar 25 мл/мин, что связано с его высокой термической стабильностью структуры. Защитные свойства покрытий можно объяснить образованием поверхностной плёнки, состоящей из кристаллитов фаз t-HfSiO<sub>4</sub>, m-HfO<sub>2</sub>, m-Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, t-ZrO<sub>2</sub>, расположенных в аморфной матрице a-Si:B:O.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект 0718-2020-0034).

### Список литературы

1. Duchaniya R. K., Pandel U., Rao P. and others // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 44, №.6. P. 4467-4473.

С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, М.Х. РАБАДАНОВ, Ш.П. ФАРАДЖЕВ, П.М. САЙПУЛАЕВ,  
А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, Р.М. ЭМИРОВ, Н.М.-Р. АЛИХАНОВ,  
Л.Р. ХИБИЕВА

*Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия*

## НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЦИРКОНАТА БАРИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ОДИН ЭТАП

Синтезированы нанопорошки цирконата бария ( $\text{BaZrO}_3$ ) методом золь-геля изготовлены керамические материалы из них. Показана возможность изготовления материалов с заданной структурой ( $\text{BaZrO}_3$ , пространственной группой  $Pm-3m$ ) и высокой долей основной фазы. На спектрах комбинационного рассеивания для порошка  $\text{BaZrO}_3$  обнаружены пики со сдвигами: при  $\sim 475 \text{ см}^{-1}$  и  $\sim 685 \text{ см}^{-1}$ , относящиеся к модам  $\text{TO}_4$  и  $\text{LO}_1$ ; около  $\sim 277 \text{ см}^{-1}$  и  $\sim 299 \text{ см}^{-1}$ , характерные активной моде  $\text{BaZrO}_3$  второго порядка. Обнаружено снижение проводимости при повышении температуры от  $\sim 25^\circ\text{C}$  до  $\sim 187^\circ\text{C}$ . Выше  $\sim 460^\circ\text{C}$  наблюдался существенный рост проводимости от температуры при различных частотах.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, M.KH. RABADANOV, SH.P. FARADZHEV,  
P.M. SAYPULAEV, A.E. RABADANOVA, D.K. PALCHAYEV, Z.KH. MURLIEVA, R.M. EMIROV,  
N.M.-R. ALIKHANOV, L.R. HIBIEVA

*Dagestan State University, Makhachkala, Russia*

## NANOSTRUCTURED MATERIALS BASED ON BARIUM ZIRCONATE, SYNTHESIS IN ONE STAGE

Barium zirconate nanopowders ( $\text{BaZrO}_3$ ) were synthesized using the sol-gel method, and ceramics were produced from them. The study demonstrates the possibility of manufacturing materials with a specific structure ( $\text{BaZrO}_3$ , space group  $Pm-3m$ ) and a high proportion of the main phase. The Raman spectra of  $\text{BaZrO}_3$  powder revealed peaks with shifts at  $\sim 475 \text{ cm}^{-1}$  and  $\sim 685 \text{ cm}^{-1}$ , which are related to the  $\text{TO}_4$  and  $\text{LO}_1$  modes, respectively, and at  $\sim 277 \text{ cm}^{-1}$  and  $\sim 299 \text{ cm}^{-1}$ , which are characteristic of the second-order active mode of  $\text{BaZrO}_3$ . The study found that conductivity decreases as temperature increases from around  $25^\circ\text{C}$  to approximately  $187^\circ\text{C}$ . At frequencies, above approximately  $460^\circ\text{C}$ , a significant increase in conductivity with temperature was observed.

В настоящее время необходимо разрабатывать технологии и выработать принципиально новые подходы преобразования энергии, используя природоподобные технологии. В этой связи топливные системы преобразования химической энергии в электрическую энергию становятся перспективными [1,2]. Наиболее изученным и привлекательным материалом для изготовления протонпроводящих электролитов являются соединения на основе цирконата бария ( $\text{BaZrO}_3$ ), в том числе составы с замещениями в системе. Проявленный интерес к материалам обусловлен их высокой химической стабильностью в атмосфере, содержащей  $\text{CO}_2$ , механической прочностью, малым коэффициентом теплового расширения и относительно высокой протонной проводимостью при температурах от  $\sim 400$  до  $\sim 700^\circ\text{C}$ .

В работе нанопорошки  $\text{BaZrO}_3$  синтезировались методом золь-гель [3]. Нитраты  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (чистота всех реактивов не менее 99%) и глицин  $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$  в количестве 2.22 моль на 1 моль материала, последовательно и через каждые равные промежутки времени, добавлялись в воду. Раствор выпаривался при непрерывном перемешивании при температурах  $\sim 350^\circ\text{C}$  до самопроизвольного воспламенения образующегося осадка. Испарение происходило со средней скоростью не более 1 мл/мин. В результате горения формировался нанопорошок с насыпной плотностью примерно  $0.03 \text{ г/см}^3$ . Для рекристаллизации частиц проводили в последующем термическую обработку при  $600^\circ\text{C}$ ,  $700^\circ\text{C}$ ,  $800^\circ\text{C}$  и  $900^\circ\text{C}$  с выдержкой при этих температурах в течение 30 мин, соответственно.

Исследована структура после каждого режима обработки для порошков и керамик из них на дифрактометре PANalytical Empyrean series 2 ( $\lambda \text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ ). Проявившиеся рефлексы на рентгенограмме соответствуют, в основном, кристаллической фазе перовскита  $\text{BaZrO}_3$  (пространственная группа  $Pm-3m$ ) и побочной фазе карбида бария ( $\text{BaC}_2$ ).

Проведены исследования спектров комбинационного рассеивания для порошка  $\text{BaZrO}_3$  в диапазоне от  $\sim 10$  до  $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$ . На спектрах обнаружены пики со сдвигами: при  $\sim 475 \text{ см}^{-1}$  и  $\sim 685 \text{ см}^{-1}$ , относящиеся к модам  $\text{TO}_4$  и  $\text{LO}_1$ ; около  $\sim 277 \text{ см}^{-1}$  и  $\sim 299 \text{ см}^{-1}$ , характерные активной моде  $\text{BaZrO}_3$  второго порядка.

Исследована проводимость керамики  $\text{BaZrO}_3$ , спеченного при  $950^\circ\text{C}$  в течение 10 часов, в зависимости от температуры и среды обработки в интервале температур  $25-600^\circ\text{C}$  и частот  $1 \text{ кГц}-10 \text{ МГц}$ . Обнаружено снижение проводимости при повышении температуры от  $\sim 25^\circ\text{C}$  до  $\sim 187^\circ\text{C}$ . Выше  $\sim 460^\circ\text{C}$  наблюдался существенный рост проводимости от температуры при различных частотах.

Работа выполнена в рамках проекта УМНИК (Договор 16504ГУ/2021 от 31.05.2021) и, частично, госзадания FZNZ-2020-0002. Исследования выполнены с использованием оборудования НОЦ «Нанотехнологии» ДГУ.

### Список литературы

1. Tsvetkov D. S. et al. *Chimica Techno Acta*. – 2020. – V.7. № 2. Т. 7. № 2, p. 42-50.
2. P. Manju et al. *Journal of the European Ceramic Society*. – 2019. Vol. 39. – Issue 13, p. 3756-3767.
3. Гаджимагомедов С.Х. и др. Патент № 2808853 С1. – 2023. от 05.12.2023г.

## СЛОИСТАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ $\text{BiFeO}_3$ , ПРОЯВЛЯЮЩАЯ МЕМРИСТИВНЫЕ СВОЙСТВА

Изготовлены пленки  $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  на поверхности подложек из кремния с аморфным слоем из оксида кремния ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ), используя методы магнетронного распыления (МР) и атомно-слоевого осаждения (АСО) в два этапа. Исследованы зависимости вольтамперных характеристик (ВАХ) для пленки без и в присутствии постоянного поперечного магнитного поля (11,5 кОе). Показана чувствительность ВАХ к постоянному магнитному полю.

S.KH. GADZHIMAGOMEDOV, M.KH. RABADANOV, SH.P. FARADZHEV, A.E.  
RABADANOVA

*Dagestan State University, Makhachkala, Russia*

## LAYERED STRUCTURE BASED ON $\text{BiFeO}_3$ EXHIBITING MEMRISTIVE PROPERTIES

The prepared films of  $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  on the surfaces of silicon substrates with an amorphous layer of silicon oxide ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ) were obtained using magnetron sputtering (MS) and atomic layer deposition (ALD) methods in two steps. The dependences of the current-voltage characteristics (CVC) for the film without and in the presence of a constant transverse magnetic field (11.5 kOe) were studied. The sensitivity of the current-voltage characteristic to a constant magnetic field is shown.

В последние годы особый интерес представляют пленочные структуры на основе различных перовскитных соединений, востребованные для изготовления мемристивных устройств [1], благодаря преимуществам: низкому энергопотреблению, высокой плотности хранения и т.д. Широкое распространение получил материал, сочетающий слой из мультиферроика и сверхпроводника ( $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ), демонстрирующий anomalous поведение электрических и магнитных свойств [2].

В работе пленочные структуры  $\text{BiFeO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$  на поверхности подложек  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  получены с использованием методов магнетронного распыления (МР) и атомно-слоевого осаждения (АСО) в два этапа.

На первом этапе пленка  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  изготавливалась методом МР, распыляя наноструктурированные мишени  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  с плотностью  $\sim 6.0 \text{ г/см}^3$  [3] в среде  $\text{Ar}+\text{O}_2$  в соотношении 1:2, при температуре подложки  $\sim 700^\circ\text{C}$  в течение  $\sim 30$  мин. После завершения процесса распыления, насыщение пленки кислородом осуществлялась при  $450\div 500^\circ\text{C}$  в течение 30 мин. На втором этапе на поверхность пленки  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  нанесен слой, содержащий соединение  $\text{BiFeO}_3$ , методом АСО [4], используя прекурсоры:  $\text{Bi}(\text{mmp})_3$  и  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ , а в качестве промежуточного окислителя – озон. Процесс нанесения проводился при температуре подложки  $\sim 250^\circ\text{C}$  и вакууме не менее  $10^{-3}$  Па.

На рисунке приведены зависимости вольтамперных характеристик (ВАХ) для пленки  $\text{BiFeO}_3/\text{YBCO}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  без и в присутствии постоянного поперечного магнитного поля. Зависимость ВАХ имеет характерный для мемристивных структур гистерезисный вид. Наибольший эффект переключения наблюдается при напряжении 5В. Видно, что образец проявляет чувствительность зависимости ВАХ к постоянному магнитному полю. Такое поведение дает возможность изготовления на основе слоистых структур новых многофункциональных мемристивных устройств, управляемых, помимо электрического поля, еще и магнитным полем.

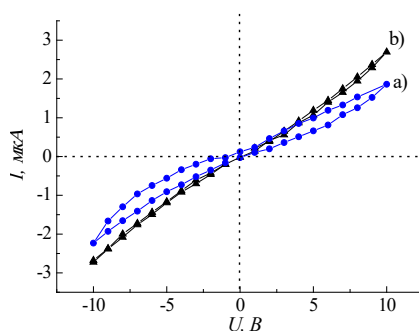


Рис. Зависимость ВАХ: без поля – а) и в постоянном магнитном поле 11,5 кОе – б) (размещение зондов планарное).

Исследования выполнены при финансовой поддержке Гос. задания FZNZ-2020-0002.

### Список литературы

1. Sarkar, A. et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, V. 2015, № 3(9), P. 2254–2263.
2. Werner-Malento K. et al. *Acta Physica Polonica A*. – 2009. – Т. 115. – №. 1. – С. 95-97.
3. Гаджимагомедов С.Х. др. *Вестник ДГУ*, 2020, Т.35 (4), С. 79-89.
4. Гаджимагомедов С.Х. и др. *Патент № 2756135С1* от 28.09.2021. Бюл. № 28.



## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР СО СВЕРХНИЗКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТРЕНИЯ

Исследованы трибохарактеристики покрытий на основе нанослоев  $\text{MoS}_2$  и  $\text{TaS}_2(\text{O})$ , структурное и химическое состояние которых обуславливали снижение сопротивление сдвигу между разнородными Ван-дер-Ваальсовыми нанофазами. Выбирались условия, обеспечивающие формирование достаточно совершенной структуры с гексагональной решеткой, базисные плоскости (002) которой были ориентированы вдоль поверхности. Слоистые ДПМ-покрытия продемонстрировали сверхнизкий коэффициент трения (около 0,01) в атмосфере азота.

M.D. GRITSKEVICH, D.V. FOMINSKI, R.I. ROMANOV, V.Yu. FOMINSKI  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OBTAINING AND INVESTIGATION OF VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES WITH AN ULTRA-LOW COEFFICIENT OF FRICTION

The tribocharacteristics of coatings based on  $\text{MoS}_2$  and  $\text{TaS}_2(\text{O})$  nanolayers were studied, the structural and chemical state of which determined a decrease in the shear resistance between dissimilar van der Waals nanophases. Conditions were chosen that ensured the formation of a fairly perfect structure with a hexagonal lattice, the basal planes (002) of which were oriented along the surface. Layered TMD coatings demonstrated an ultra-low coefficient of friction (about 0.01) in a nitrogen atmosphere.

Покрытия на основе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), создаваемые различными методами осаждения, преимущественно обладают нанокристаллической или аморфной структурой, которая в процессе трибоконтакта меняется. При контакте с контртелом на поверхности покрытий формируется трибопленка со слоистой упаковкой атомов, характерной для гексагональной 2H-фазой, что является энергоёмким процессом.

В данной работе представлены результаты исследования нанопокровтий, представляющих собой слоистые Ван-дер-Ваальсовы гетероструктуры, где обеспечивается плоскостная стабильность 2D кристаллов за счёт сильных ковалентных связей. Полученные покрытия обладают сверхнизким коэффициентом трения (около 0,01) – так называемым эффектом суперсмазки. Трибоиспытания проводились в атмосфере азота методом скользящего стального шарика по покрытию, осажденному на кремний. Данный эффект редко достигается в макро-масштабах, и тем более применяется на практике [1]. Слои создавались методом реакционного импульсного лазерного осаждения в сероводороде при повышенной температуре. Это вызвало частичное окисление тонких Ta-содержащих нанослоев. При создании покрытий на основе  $\text{MoS}_2/\text{TaS}_2(\text{O})$  удалось получить структуру с отделёнными друг от друга слоями, что подтверждается посредством рамановской спектроскопии (рисунок 1а). Исследования поперечного сечения покрытий методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) также показали, что поочередное осаждение Mo- и Ta-содержащих слоев вызывает формирование многослойного покрытия с относительно резкими межфазными границами, ориентированными параллельно поверхности покрытия (рисунок 1б).

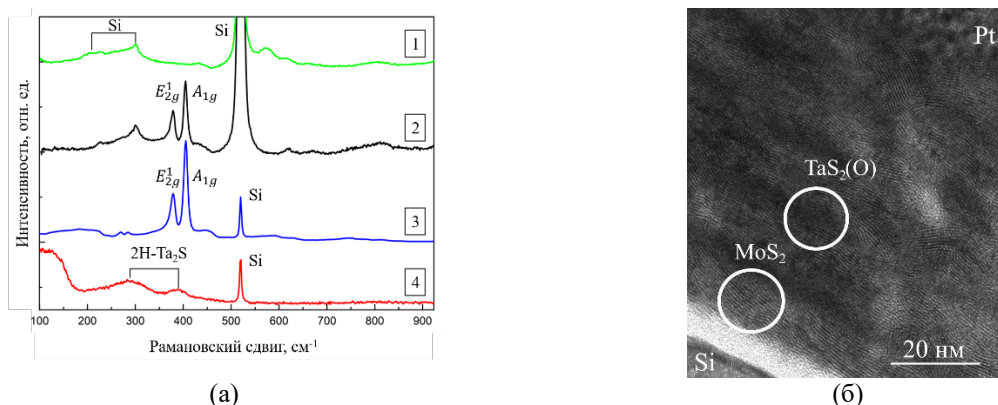


Рис. 1. (а) Микрорамановские спектры для однослойной тонкой пленки  $\text{TaS}_2(\text{O})$  (1), однослойной пленки  $\text{MoS}_2$  (2), многослойной пленки из чередующихся ультратонких слоев  $\text{MoS}_2$  и  $\text{TaS}_2(\text{O})$  (3) и более толстой пленки  $\text{TaS}_2$  (4); (б) ПЭМ ВР многослойного покрытия (Pt использовалась при ламели методом ионного травления).

### Список литературы

1. D.Berman, A.Erdemir, A.V. Sumant, Approaches for Achieving Superlubricity in Two-Dimensional Materials// ACS Nano. 2018.

Д.С. ДАЙБАГЕ<sup>1,2,3</sup>, С.А. АМБРОЗЕВИЧ<sup>1,2</sup>, А.В. ОСАДЧЕНКО<sup>2</sup>, И.А. ЗАХАРЧУК<sup>2</sup>,

А.С. СЕЛЮКОВ<sup>1,2,3</sup>, М.С. СМОРНОВ<sup>4</sup>, О.В. ОВЧИННИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва

<sup>3</sup>Московский политехнический университет

<sup>4</sup>Воронежский государственный университет

## ФОТОУСИЛЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdTe/SiO<sub>2</sub>

Представлены результаты исследования люминесцентных свойств квантовых точек CdTe/SiO<sub>2</sub> при непрерывном лазерном облучении при комнатной температуре. Обнаружено, что с течением времени при непрерывном лазерном облучении происходит увеличение интенсивности фотолюминесценции квантовых точек. Наблюдаемое фотоусиление интенсивности люминесценции связано с пассивацией ловушек, и как следствие, увеличением вероятности излучательных переходов.

D.S. DAIBAGYA<sup>1,2,3</sup>, S.A. AMBROZEVICH<sup>1,2</sup>, A.V. OSADCHENKO<sup>2</sup>, I.A. ZAKHARCHUK<sup>2</sup>,

A.S. SELYUKOV<sup>1,2,3</sup>, M.S. SMIRNOV<sup>4</sup>, O.V. OVCHINNIKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>Moscow Polytechnic University

<sup>4</sup>Voronezh State University

## PHOTOENHANCEMENT OF LUMINESCENCE IN OF COLLOIDAL CdTe/SiO<sub>2</sub> QUANTUM DOTS

The results of the study of luminescent properties of CdTe/SiO<sub>2</sub> quantum dots under continuous laser irradiation at room temperature are presented. It is found that under continuous laser irradiation there is an increase in the photoluminescence intensity of quantum dots in time. The observed photoluminescence intensity enhancement is associated with passivation of traps and, as a consequence, an increase in the probability of radiative transitions.

Интерес к квантовым точкам (КТ) вызван возможностью контроля их оптических и электронных свойств с помощью изменения размера наночастиц [1]. С течением времени оптические свойства КТ могут изменяться, например, возможна фотодеградация [2] или фотоусиление [3] интенсивности фотолюминесценции (ФЛ). На данный момент установлено, что ширина запрещенной зоны КТ CdTe/SiO<sub>2</sub> практически не изменяется с ростом температуры, однако остается открытым вопрос о фотостабильности интенсивности ФЛ при непрерывном лазерном облучении. Данная работа направлена на решение этого вопроса.

Регистрацию спектров ФЛ при непрерывном лазерном облучении проводили при комнатной температуре в течение 110 минут с помощью спектрометра Ocean Optics Maya 2000 Pro и импульсного лазера PicoQuant LDH-C 400 (длина волны излучения 405 нм).

Из рисунка 1 видно, что при непрерывном лазерном облучении происходит увеличение интенсивности и интегральной интенсивности ФЛ на  $\Delta S = 8,1\%$ . Наблюдаемое фотоусиление интенсивности ФЛКТ связано с адсорбцией молекул воды на поверхности КТ и, как следствие, уменьшением вероятности безызлучательных переходов за счет пассивации ловушек [3].

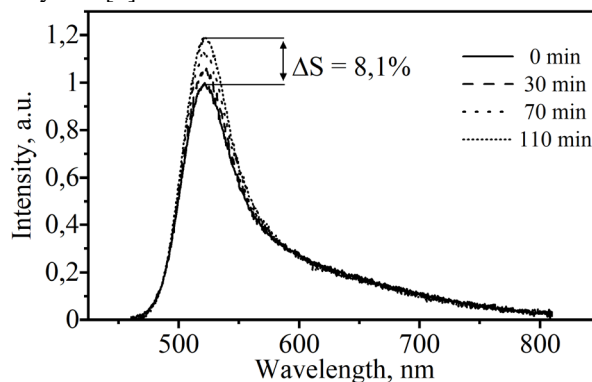


Рис. 1. Спектры ФЛ КТ в зависимости от времени.

### Список литературы

1. Takagahara T., Takeda K. // Physical Review B. 1992. V. 46. P. 15578.
2. Ovchinnikov O.V., Grevtseva I.G., Smirnov M.S., Kondratenko T.S. // Journal of Luminescence. 2019. V. 207. P.626–632.
3. Carrillo-Carrión C., Cárdenas S., Simonet B.M., Valcárcel M. // Chemical Communications. 2009. V. 35. P. 5214–5226.

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ НА ФРАКТАЛЬНОСТЬ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СВЕРХТОНКОЙ НАНОСЕТИ Ni

Исследована фрактальная размерность наносети Ni на разных стадиях ее формирования методом лазерной абляции в среде сверхтекучего гелия. На ранних этапах абляции наносеть состоит из отдельных нанопроводов и имеет прямоугольную петлю магнитного гистерезиса. Увеличение времени абляции приводит к появлению наносфер в наносети Ni, при этом параметр прямоугольности петли магнитного гистерезиса уменьшается.

E.V. DVORETSKAYA, R.B. MORGUNOV

Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia

## INFLUENCE OF LASER ABLATION ON THE FRACTALITY AND MAGNETIC PROPERTIES OF AN ULTRAFINE NANONETWORK Ni

The fractal dimension of the Ni nanonetwork was studied at different stages of its formation using the laser ablation method in a superfluid helium environment. At the early stages of ablation, the nanonetwork consists of individual nanowires and has a rectangular magnetic hysteresis loop. Increasing the ablation time leads to the appearance of nanospheres in the Ni nanonetwork, while the squareness parameter of the magnetic hysteresis loop decreases.

Магнитные наноструктуры, такие как нанопровода, наночастицы, наносферы [1], широко применяются в разработке устройств магнитной логики и магнитной памяти [2], а также в биофизике и медицине [3]. Перспективными считаются магнитные наносети, которые обладают фрактальной размерностью и свойствами, которые значительно отличаются, как от единичных наносфер, так и от одиночных нанопроводов [4].

В работе исследованы магнитные свойства наносети Ni, полученной методом лазерной абляции в среде сверхтекучего He. На ранних этапах абляции наносеть состоит в основном из ультратонких аморфных нанопроводов Ni (диаметр < 4nm) (Рис. 1а) и имеет прямоугольную петлю магнитного гистерезиса (Рис. 1с). Увеличение времени абляции приводит к образованию поликристаллических наносфер Ni, встроенных в наносеть из нанопроводов (рис. 1б), при этом петля гистерезиса имеет наклонную форму (Рис. 1д). Рост магнитного момента описывается сверхлинейной степенной зависимостью, характерной для диффузионных процессов.

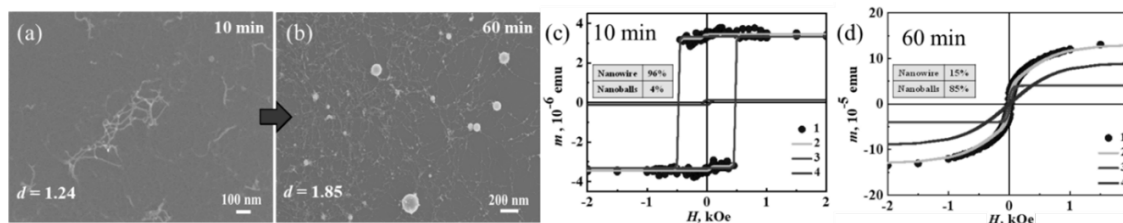


Рис. 1. SEM изображения наносети Ni после 10-минутной (а) и 60-минутной (б) лазерной абляции с указанием показателя фрактальности  $d$ . Серии петель магнитного гистерезиса, наносети Ni после 10-минутной (с) и 60-минутной (д) абляции. Круглые символы (1) – экспериментальные данные; светло-серые линии (2) – аппроксимация двумя гистерезисами. Отдельные магнитные вклады нанопроводов и наносфер показаны тонкими сплошными темно-серыми (3) и черными (4) линиями, соответственно. Относительные объемные концентрации нанопроводов и наносфер обозначены на соответствующих рисунках.

Наносеть Ni представляет собой фрактальную структуру, формирующуюся в несколько стадий с постепенным увеличением показателя фрактальности  $d$  с 1.24 до 1.85 при увеличении Ni в наносети. Из данных сканирующей электронной микроскопии наноструктуры Ni установлено, что основными элементами, образующими фрактальную структуру являются нанопровода Ni. Путем изменения времени абляции можно контролировать и создавать самоподобные структуры требуемой формы с заданными магнитными свойствами. Установлено изменение намагниченности насыщения при изменении фрактальности наносети, что при постоянных условиях абляции объясняется преобразованием нанопроводов в наносферы при их сворачивании.

Работа выполнена при поддержке программы Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН 124013100858-3.

### Список литературы

1. Stoner E.C., Wohlfarth E.P. A mechanism of magnetic hysteresis in hetero-geneous alloys. Philosophical Transactions of the Royal Society of London: London, United Kingdom. 1948. P. 599-642.
2. Karmakar S., Kumar S., Rinaldi R. and others // J. Phys. Conf. Ser. 2011. №. 292. P. 012002.
3. Akbarzadeh A., Samiei M., Davaran S. and others // Nanoscale Res. Lett. 2012. Vol. 7. P. 144.
4. Bürger D., Zhou S., Höwler M. and others // Subsecond Annealing of Advanced Materials, Springer International Publishing Switzerland. 2014. Vol. 192, №15.

А.И. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Л.С. ПАРШИНА<sup>2</sup>, М.С. ДИТРИЕВА<sup>1</sup>, О.Д. ХРАМОВА<sup>2</sup>,  
О.А. НОВОДВОРСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ПХФ и МХ РАН, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup>ИППЛИТ РАН, Шатура, Россия

## МАГНЕТИЗМ ПЛЕНОК InMnSb, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОСАЖДЕНИЯ

Исследован магнетизм пленок InMnSb, полученных методом импульсного лазерного осаждения. В различных магнитных полях измерены температурные зависимости намагниченности пленок  $M(T)$ , охлажденных в нулевом магнитном поле (ZFC) и магнитном поле напряженностью 50 кЭ (FC), а также петли магнитного гистерезиса  $M(H)$ . Анализ полученных магнитных данных показал, что пленки состоят из двух магнитных подсистем: ферромагнитная подсистема нановключений MnSb и парамагнитная подсистема диспергированных ионов  $Mn^{2+}$  в матрице InSb.

A.I. DMITRIEV<sup>1</sup>, L.S. PARSHINA<sup>2</sup>, M.S. DMITRIEVA<sup>1</sup>, O.D. KHRAMOVA<sup>2</sup>, O.A.  
NOVODVORSKY

<sup>1</sup>FRC PCP MC RAS, Chernogolovka, Russia

<sup>2</sup>ILIT RAS, Shatura, Russia

## MAGNETISM OF InMnSb FILMS OBTAINED BY PULSED LASER DEPOSITION

The magnetism of InMnSb films obtained by pulsed laser deposition has been studied. The temperature dependences of the magnetization of films  $M(T)$  cooled in a zero magnetic field (ZFC) and a magnetic field with a strength of 50 kOe (FC), as well as magnetic hysteresis loops  $M(H)$ , were measured in various magnetic fields. The analysis of the obtained magnetic data showed that the films consist of two magnetic subsystems: the ferromagnetic subsystem of MnSb nanoclusions and the paramagnetic subsystem of dispersed  $Mn^{2+}$  ions in the InSb matrix.

Детальный анализ температурных зависимостей  $M(T)$  парамагнитной фракции функцией Кюри-Вейса позволила оценить концентрацию диспергированных примесных ионов  $Mn^{2+}n_i=(6.8\pm 0.5)\cdot 10^{19}cm^3$ , которая заметно превосходит предел растворимости примеси марганца в массивных кристаллах InSb. В результате анализа кривой  $M(T)$  ферромагнитной фазы нановключений MnSb в рамках закон Блоха 3/2 определены намагниченность насыщения  $M_S=225\pm 24$  ед. СГСМ/см<sup>3</sup> ( $1.1\pm 0.1$  мВ/ион) и температура Кюри  $T_C=529\pm 6$ К нановключений MnSb. Значения обеих величин оказались заметно ниже, чем в массивных монокристаллических образцах. Зависимости  $M(H)$  нановключений MnSb аппроксимировались функцией Ланжевена, что позволило оценить число нановключений MnSb в единице объема пленки InMnSb  $n=(1.7\pm 1.4)\cdot 10^{18}cm^3$  и их среднюю намагниченность  $m=(1.1\pm 0.1)\cdot 10^{-16}$ ед. СГСМ (в среднем 12000 мВ на одно нановключение). Величина коэрцитивной силы нановключений MnSb, равная 375Э, оказалась близка к соответствующему значению как для пленок MnSb, так и для наночастиц MnSb, полученных ранее различными методами. Анализ FC – ZFC зависимостей, измеренных в различных полях, позволил установить зависимость температуры блокировки  $T_b$  нановключений MnSb от напряженности внешнего магнитного поля  $H$ . Аппроксимация зависимости  $T_b(H)$  позволила оценить значения поля  $H_a=812\pm 265$ Э и константы магнитной анизотропии  $K=(1.1\pm 0.3)\cdot 10^5$  эрг/см<sup>3</sup>, которые оказались близки к соответствующей величине определенной ранее для монокристаллов  $Mn_xSb_{1-x}$  нестехиометрического состава  $x=52.8$  %.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках Государственных заданий ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег. номер 124013100858-3) и ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

## ИНФРАКРАСНЫЙ ФОТО-ДЕТЕКТОР С ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ В СТРУКТУРАХ С ДВУМЯ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

В ходе нашей работы были произведены и охарактеризованы резонансные фотодетекторы для среднего ИК диапазона (15 мкм). В качестве материала детекторов использовалась гетеро структура GaAs с двумя квантовыми ямами, разделенными узким туннельным барьером. При температурах ниже 20К в образцах наблюдается значительный фото отклик. На основании полученных данных произведены расчёты чувствительности и соотношения сигнала к шуму.

S.R.YEGIYAN, V.N. ANTONOV, O.A. KLIMENKO  
Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

## HIGHLY SENSITIVE INFRARED PHOTO-DETECTOR BASED ON DOUBLE QUANTUM WELL STRUCTURE

During our research we have fabricated and characterise resonance charge sensitive IR detectors (wavelength 15mkm). The devices were actualised within GaAs heterostructures with double quantum wells. At temperatures below 20K we observed reasonable photo response. According to obtained experimental data we have defined the sensitivity and SNR of the devices.

На сегодняшний день в диапазоне от рентгена до длин волн порядка 1,5 мкм нам доступны различные типы высокочувствительных фотонных детекторов, однако в длинноволновом диапазоне ( $\lambda > 10\mu$ , частоты ниже 30 ТГц), энергии фотонов много меньше ( $h\nu < 124$  мэВ), что значительно усложняет процесс регистрации излучения слабой интенсивности. К сожалению, на данный момент, большинство предложенных решений данной проблемы опираются на экстремально низкие температуры ( $< 0,15$  К). Тем не менее дальний инфракрасный и ТГц диапазон то богатая область спектроскопии, охватывающая вращательные и вибрационные спектры молекул, жидкостей и твердых тел, а также энергетические спектры электронов в полупроводниковых наноструктурах. В этом контексте крайне актуальными становятся исследования CSIP (ChargesensitiveIRPhoto-transistor), демонстрирующие высокую чувствительность при температурах вплоть до 70К [1].

Работа произведенных нами детекторов основана на резонансном туннелировании электронов между двумя потенциальными ямами в гетеро структуре GaAs. При подаче необходимого напряжения на BG (Рис.1 (b)), область верхней квантовой ямы электрически изолируется от канала проводимости (Рис.1 (a)). При поглощении излучения электроны в верхней квантовой яме возбуждаются с основного состояния и туннелируют в нижнюю квантовую яму. Изолированный «остров» приобретает положительный потенциал, что в свою очередь увеличивает проводимость через нижний канал. Иными словами, прибор работает как фоточувствительный транзистор с плавающим затвором.

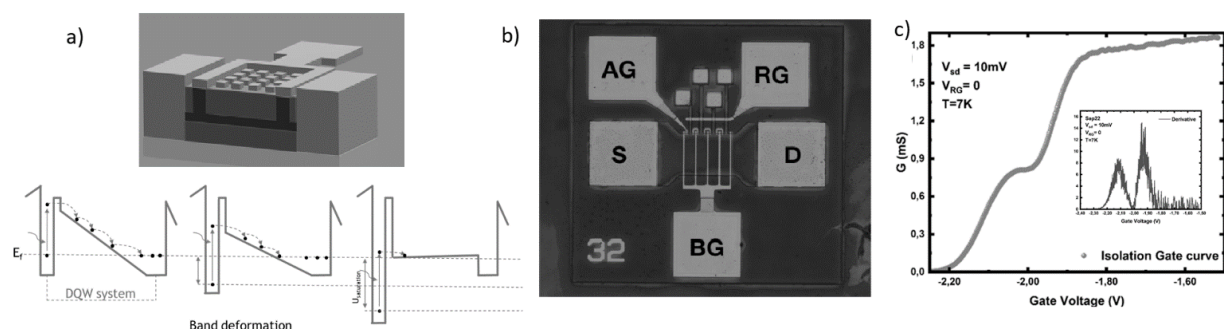


Рис. 1. а) Схематическое изображение детектора и электронная структура; б) Фотография произведенного устройства в микроскопе; в) Затворная характеристика устройства при  $T=7$  К.

В ходе исследования мы произвели измерения динамики затворной характеристики в температурном диапазоне от 6 до 300К. В измерениях фото отклика использовалось тепловое излучение (до 300 К). Для активной площади детектора ( $120 \mu\text{m}^2$ ) были рассчитаны параметры NEP ( $\sim 10^{-18}$  W) и  $D \sim 10^{15} \text{ cm}^2 \cdot \text{Hz}^{-1} / \text{W}$  вблизи резонансной длины волны (15  $\mu\text{m}$ ).

### Список литературы

1. Takeji Ueda, Zhenghua An, Kazuhiko Hirakawa, and Susumu Komiyama, Journal of Applied Physics 103, 093109 (2008).

Т. ЖУРАБОВЕВ<sup>1</sup>, Н. ЭСАНТУРДИЕВА<sup>2</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан.

<sup>2</sup>Институт предпринимательства и педагогики Денова, Денов, Узбекистан

<sup>3</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## ПОВЕРХНОСТЬ С ВЫСОКИМ ИНДЕКСОМ ДЛЯ РОСТА ГРАФЕНА

Стабильность катализатора важна для синтеза графена, и результаты молекулярной динамики показывают, что поверхность Ni(331) обладает наилучшей стабильностью и каталитической активностью среди поверхностей с высоким индексом, что делает ее перспективной для синтеза и применения графена.

T. JURABOEV<sup>1</sup>, N. ESANTURDIYEVA<sup>2</sup> U. KHALILOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan.

<sup>2</sup>Denau Institute of Entrepreneurship and Pedagogy, Denau, Uzbekistan

<sup>3</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## HIGH INDEX SURFACE FOR GRAPHENE GROWTH

The stability of the catalyst is crucial for graphene synthesis, and molecular dynamics results indicate that the Ni (331) surface exhibits the best stability and catalytic activity among high-index surfaces, making it promising for the synthesis and application of graphene.

Стабильность катализатора имеет решающее значение в синтезе графена для минимизации дефектов и оксида графена при одновременном контроле зародышеобразования [1]. Из-за низкой поверхностной энергии поверхности с низким индексом широко используются в синтезе графена, а растущий интерес к поверхностям с высоким индексом обусловлен их превосходной каталитической активностью по сравнению с поверхностями с низким индексом [2]. Поэтому значения поверхностной энергии были определены с использованием молекулярной динамики для оценки стабильности поверхностей с высоким индексом Ni (310), (311) и (331) из-за их высокой каталитической активности. Результаты показали, что поверхностные энергии поверхностей Ni (331), Ni (310) и Ni (311) составляют соответственно 2 Дж/м<sup>2</sup>, 2,1 Дж/м<sup>2</sup> и 2,12 Дж/м<sup>2</sup> (Рис. 1). Из-за более низкой поверхностной энергии среди этих трех поверхностей с высоким индексом Ni (331) демонстрирует большую стабильность. Благодаря превосходному сочетанию высокой каталитической активности и стабильности поверхность Ni(331) может быть перспективной для использования в синтезе графена и его применениях.

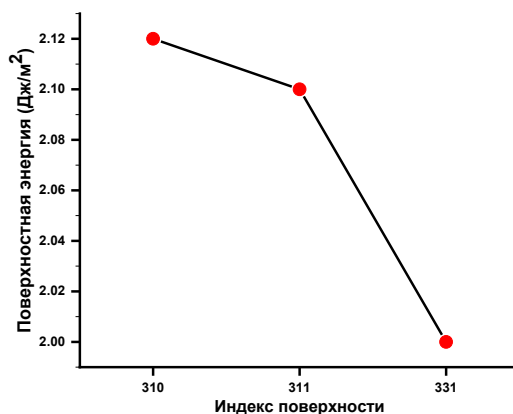


Рис. 1. Поверхностная энергия высокоиндексных поверхностей кристалла никеля.

### Список литературы

1. M. Li, Y. Li, JM. Mbengue. Surface Energy. – IntechOpen, 2015.
2. C. Xiao, B. Lu, A. Xue, N. Tian, Z. Zhou). Joule, 4 (12), (2020) 2562-2598.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ СИСТЕМЫ ВТСП МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Методом молекулярной динамики выполнен расчет участка петли перемagnetизации высокотемпературного сверхпроводника с искусственными центрами пиннинга. Продемонстрированы процессы проникновения вихрей в образец и выхода из него, оценен характерный временной масштаб релаксации вихревой системы. Показано хорошее соответствие результатов моделирования имеющимся экспериментальным и расчетным данным.

V.V. ZALETKINA, A.N. MOROZ, I.A. RUDNEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MODELING OF THE VORTEX SYSTEM USING THE MOLECULAR DYNAMICS METHOD

Using the molecular dynamics method, a section of the magnetization reversal loop of a high-temperature superconductor with artificial pinning centers have been calculated. The processes of vortex penetration into and exit from the sample have been demonstrated, and the characteristic time scale of relaxation of the vortex system has been estimated. The simulation results have been shown to be in good agreement with the available experimental and calculated data.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) нашли свое применение во многих технических областях благодаря способности без сопротивления пропускать большие плотности тока и захватывать большие по величине магнитные поля. В инженерных применениях сверхпроводящие элементы устройств могут подвергаться нестационарным воздействиям, к примеру, импульсам магнитного поля при накачке методом PFM (Pulsed Field Magnetization) и пропусканию нестационарного тока при зарядке или разрядке кинетического накопителя. При подобных условиях существует риск возникновения квенчей – спонтанных локальных переходов в несверхпроводящее состояние, вызванных перегревом сверхпроводника и способных вывести из строя, как отдельные сверхпроводящие элементы, так и все устройство [1]. Таким образом, становится актуальной задача исследования отклика ВТСП на различные нестационарные внешние воздействия. Поскольку основной вклад в транспортные и магнитные свойства сверхпроводящих композитов вносит вихревая система, целесообразно рассматривать данную задачу с точки зрения вихревой динамики, и для ее решения удобно применять численное моделирование.

В настоящей работе был реализован метод молекулярной динамики (МД) для вихревой системы сверхпроводника. Возможность учета реального времени позволяет рассматривать данный метод в качестве инструмента для моделирования вихревой динамики на малых временных масштабах. Мы представляем первые результаты расчета для квадратной пластины сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (глубина проникновения магнитного поля  $\lambda = 120$  нм, длина когерентности  $\xi = 2.2$  нм, критическая температура  $T_c = 93$  К) размером  $36\lambda$  с треугольной решеткой дефектов (двумерная концентрация  $n_{def}$  составила  $5.3 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup>, параметр решетки дефектов  $d = 120$  нм). Дефекты имели вид прямоугольных потенциальных ям глубиной  $a = 0.15$  эВ и радиусом  $r = 25\xi$ , что соответствует размерам наноточек, используемых в экспериментах [2]. Проведен расчет участка петли перемagnetизации в широком диапазоне магнитных полей и получен набор вихревых конфигураций, демонстрирующих процесс проникновения вихрей в образец и выход из него. Выполнена оценка времени релаксации вихревой системы. Результаты наших расчетов показывают хорошее соответствие с имеющимися экспериментальными и расчетными данными [3].

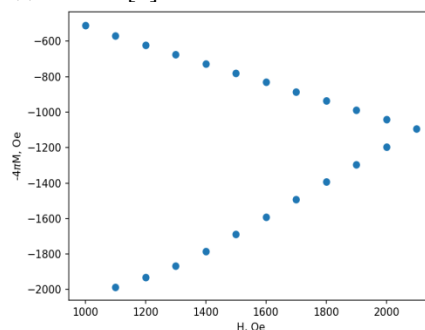


Рис. 1. Рассчитанный участок петли перемagnetизации сверхпроводника  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-1900394.

### Список литературы

1. H. Fujishiro, T. Hiyama, T. Miura // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. Vol. 19. P. 3545-3548.
2. M. J. Wang and others // Journal of Alloys and Compounds. 2021. P. 160138.
3. C. Reichhardt, J. Groth and others // Physical Review B. Vol. 1997. Vol. 54, №2. P. 16108-16115.

М.Г. ИСАЕНКОВА<sup>1</sup>, О.А. КРЫМСКАЯ<sup>1</sup>, В.А. ФЕСЕНКО<sup>1</sup>, М.И. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.В. КОЗЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ НЕЙТРОНОВ И СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В работе рассмотрены вопросы обработки дебаевских колец, полученных при дифракции нейтронов и синхротронного излучения, для построения обобщенных прямых полюсных фигур. Использование нейтронного пучка или синхротронного излучения и 2D-детектора существенно упрощает анализ кристаллографической текстуры и описание субструктурного состояния как деформированных, так и отожженных поликристаллических материалов. Показано, что неоднородность субструктуры деформированного материала предопределяет развитие её совершенствования на стадии полигонизации, рекристаллизации и фазовых превращений.

M.G. ISAENKOVA<sup>1</sup>, O.A. KRYMSKAYA<sup>1</sup>, V.A. FESENKO<sup>1</sup>, M.I. PETROV<sup>1</sup>, I.V. KOZLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## USING DIFFRACTION OF NEUTRONS AND SYNCHROTRON RADIATION TO ANALYZE THE CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE OF POLYCRYSTALLINE MATERIALS

The paper examines the issues of processing Debye rings obtained from diffraction of neutrons and synchrotron radiation to construct generalized direct pole figures. The use of a neutron beam or synchrotron radiation and a 2D detector greatly simplifies the analysis of the crystallographic texture and the description of the substructural state of both deformed and annealed polycrystalline materials. It is shown that the heterogeneity of the substructure of a deformed material predetermines the development of its improvement at the stage of polygonization, recrystallization and phase transformations.

Кристаллографическая текстура определяет анизотропию циркониевых сплавов и является чувствительным индикатором всех процессов, протекающих в материалах при пластической деформации, термообработке и эксплуатации. В настоящее время развитие методов растровой электронной микроскопии (РЭМ), а также дифракции нейтронов (ДН) и синхротронного излучения (СИ) позволяют существенно упростить трудоемкую процедуру текстурного анализа с использованием традиционного рентгеновского метода (РМ), основанного на результатах съемки образца «на отражение». Описанные методы позволяют исследовать разные объемы материала, находящиеся либо в поверхностном слое толщиной 0,1 мкм (РЭМ) или 10-20 мкм (РМ), либо на глубине 150 мкм (СИ) и более 4 мм (ДН). Сопоставление разных данных позволяет не только обнаружить различия, но и установить закономерности развития текстуры в результате различных процессов, протекающих при повышении температуры отжига в разных объемах деформированного материала [1-2].

Основным конструкционным материалом тепловых ядерных реакторов является цирконий, который обладает низким сечением захвата нейтронов, высокими механическими и коррозионными свойствами. Гексагональная структура  $\alpha$ -Zr, являющаяся главной фазой всех промышленных циркониевых сплавов, определяет анизотропию их свойств и значимость корректной оценки её кристаллографической текстуры. Данная работа посвящена развитию методов количественного рентгеновского анализа текстуры деформированных и отожженных труб и листов из циркониевых сплавов разного состава российского производства при использовании нейтронного пучка и синхротронного излучения и сопоставлению полученных данных с результатами традиционного рентгеновского метода текстурного анализа и электронной микроскопии (EBSD-метод). Изменение геометрии съемки на нейтронном пучке позволило также построить обобщенные прямые полюсные фигуры для канальных труб из сплава Э125, характеризующие пространственное распределение искаженности кристаллической структуры зерен разной ориентации.

### Список литературы

1. Isaenkova M.G., Krymskaya O.A., Klyukova K.E. et al., // Letters on Materials **13**(4), 341 (2023).
2. Isaenkova M., Krymskaya O., Klyukova K. et al., // Metals **13**(10), 1784 (2023).



## ВЫХОД ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ПРИ РАСПЫЛЕНИИ KBr ЩЕЛОЧНЫМИ ИОНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Исследовалась эмиссия отрицательно-ионных кластеров при распылении поверхности KBr ионами цезия ( $E_0=0,1-3,0$  кэВ) и зависимость выход кластерных ионов от температуры. С повышением температуры распыляемой поверхности происходит цезирование поверхности, т.е. имплантированный цезий начинает диффундироваться к поверхности, что приводит к увеличению выхода отрицательных ионов.

Z.A. ISAKHANOV, R. DJABBARGANOV, R.T. KURBANOV, M.A. MACHMUDOV

*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan*

## THE EXIT OF NEGATIVE IONS WHEN SPUTTERING KBr WITH ALKALINE IONS, DEPENDING ON TEMPERATURE

The emission of negative ion clusters during sputtering of a KBr surface with cesium ions ( $E_0=0,1-3,0$  keV) and the dependence of the exit of cluster ions on temperature were studied. As the temperature of the sprayed surface increases, the surface becomes cesium-coated, i.e. the implanted cesium begins to diffuse to the surface, which leads to an increase in the exit of negative ions.

Изучение ионного распыления поверхности валентных и ионных кристаллов представляет собой большой интерес с точки зрения механизма образования кластеров и ионного образования при распылении. В частности, для бинарных соединений с ионной и ковалентной связью и с широкой запрещенной зоной распыление и ионизация будут происходить по более сложному механизму, чем при распылении однокомпонентных металлов и полупроводников [1]. Распыление многокомпонентных мишеней может пролить свет на фундаментальные аспекты процесса распыления, которые трудно идентифицировать на однокомпонентных мишенях. Диффузия в ионных кристаллах происходит преимущественно за счет движения вакансий в решетке, а рост проводимости с температурой обусловлен ускорением диффузии при повышении температуры.

В работе исследовалась эмиссия отрицательно-ионных кластеров при распылении поверхности KBr ионами цезия ( $E_0=0,1-3,0$  кэВ), выход кластерных ионов от температуры. Масс-спектрометрический анализ отрицательно-ионной составляющей продуктов распыления показало, что ионы  $K_n^-$  начинают появляться в спектре при температуре поверхности  $250^\circ$  C. С ростом температуры распыляемой поверхности KBr фиксируются ионы  $Br_n^-$  и  $(K_m Br_n)^-$  со все большими значениями  $n$  и  $m$ , а температурная зависимость выходов кластерных ионов изображается возрастающей прямой линией.

На рис. 1 приведены зависимости соотношения интенсивностей  $Br^-/K^-$  и  $Br_2^-/K_2^-$  от температуры. Из рисунка видно, что при низких температурах мишени ( $0-200^\circ$ C) наблюдается очень высокий выход отрицательных ионов галогенов по отношению к выходу отрицательных ионов щелочей, а с увеличением температуры их соотношение становится почти неизменным. Это связано с тем, что при низких температурах происходит преимущественное распыление галогенов, так как их энергия сродства к электрону намного больше, чем у щелочных металлов, и поэтому в температурных зависимостях до  $200-250^\circ$ C наблюдается очень малый выход отрицательных ионов щелочных металлов. Увеличение выхода кластерных ионов с повышением температуры распыляемой поверхности обусловлено значительным увеличением количества вакансий и дефектов внедрения и тем, что все большее количество ионов  $Br^+$  и  $K^+$  занимает место дефекта внедрения или образованию вакансии вблизи других ионов щелочей и галогенов, что способствует образованию отрицательных ионов. С повышением температуры происходит цезирование поверхности, так как имплантированный Cs диффундируется к поверхности и увеличивается выход отрицательных ионов. При низких температурах распыление происходит в основном за счет столкновительных процессов [2], а с повышением температуры возрастает роль электронных процессов, что способствует выходу отрицательных ионов щелочных металлов. С увеличением температуры нарушается энергия связи, происходит частичное испарения, что приводит к увеличению образования отрицательных ионов.

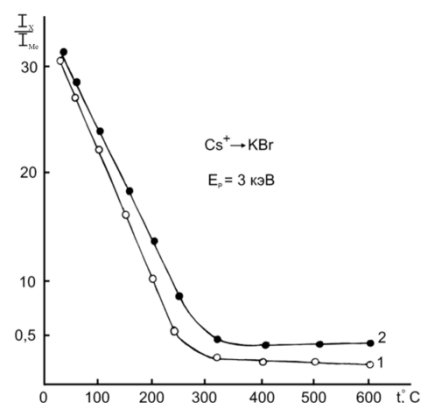


Рис. 1. Температурная зависимость соотношений интенсивностей  $Br^-/K^-$  (1) и  $Br_2^-/K_2^-$  (2) при распылении KBr ионами  $Cs^+$ .

### Список литературы

1. Р. Джаббарганов, Б.Г. Атабаев, З.А. Исаханов, У.Б. Шаропов. Поверхность: Рентген., синхрон. и нейтрон. исследов., 2019, №7, С.87-91 DOI: 10.1134/S0207352819070047.
2. Biersack J.P., Santner E. // J.Phys. (France) 1976, V.3, N12, p.541-542.

А.В. КАЛАШНИКОВ, А.В. КРАСАВИН, В.Д. НЕВЕРОВ  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА КРИТИЧЕСКУЮ ТЕМПЕРАТУРУ СВЕРХПРОВОДНИКА В РАМКАХ ПРИБЛИЖЕНИЯ БОГОЛЮБОВА-ДЕ ЖЕНА

Численно решены уравнения Боголюбова-де Жена на квадратной решётке для сверхпроводника со случайным распределением примесей. Получены зависимость параметра порядка от температуры и куполообразная зависимость критической температуры от доли немагнитных примесей.

A.V. KALASHNIKOV, A.V. KRASAVIN, V.D. NEVEROV  
National Research Nuclear University MEPhI (MoscowEngineeringPhysicsInstitute), Moscow, Russia

## THE EFFECT OF IMPURITIES ON THE CRITICAL TEMPERATURE OF A SUPERCONDUCTOR IN THE FRAMEWORK OF THE BOGOLIUBOV-DE GENNES APPROXIMATION

The Bogoliubov-de Gennes equations on a square lattice are solved numerically for a superconductor with a random distribution of impurities. The dependence of the order parameter on temperature and the dome-shaped dependence of the critical temperature on the non-magnetic impurities concentration are obtained.

Задача об увеличении критической температуры сверхпроводника является одной из крупнейших проблем физики твердого тела, так как ее решение в перспективе может привести к созданию материалов, сверхпроводящих при комнатной температуре. В настоящей работе в рамках формализма Боголюбова-де Жена показано, что значение критической температуры может быть увеличено за счет введения в сверхпроводник немагнитных примесей. В сильно разупорядоченном сверхпроводнике пары носителей заряда кластеризуются, образуя устойчивую к температуре сверхпроводимость. Получены зависимость параметра порядка сверхпроводника от температуры и зависимость критической температуры от доли немагнитных примесей, которая имеет характерный куполообразный вид (рис.1), многократно наблюдаемый в экспериментах (см. [1]).

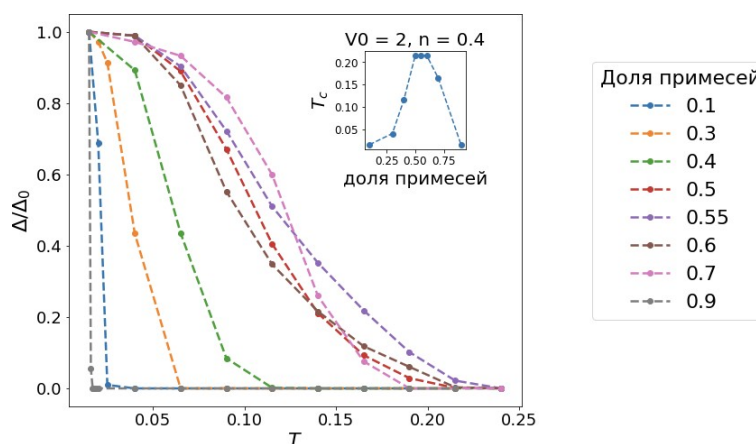


Рис.1. Зависимость параметра порядка от температуры для различной концентрации примесей. Врезка: зависимость критической температуры от концентрации примесей для амплитуды потенциала беспорядка  $V_0=2$  и среднего заполнения электронов  $n=0.4$ .

### Список литературы

1. Zhao, K., Lin, H., Xiao, X. et al. «Disorder-induced multifractal superconductivity in monolayer niobium dichalcogenides», Nat.Phys., **15**, 904–910 (2019).

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ЭНЕРГИИ**

Представлен систематический подход для описания кинетики возбуждений в ферми-газе с высоким разрешением по энергии и импульсам. Приведены основные теоретические соотношения, даны результаты расчетов для времен релаксации. Демонстрируется и обсуждается роль процессов переброса и формы зоны Бриллюэна.

P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **NUMERICAL SIMULATION OF ELECTRON GAS KINETICS WITH FINE ENERGY RESOLUTION**

We present the systematic description for the excitation kinetics in the Fermi gas, benefitting from fine resolution in the energy- and momentum space. Main theoretical relations and calculation results for the quasiparticle relaxation times are given. The role of Umklapp processes and the Brillouin zone shape is demonstrated and discussed.

Экспериментальные исследования материалов методом «накачка–зондирование», где используется возбуждение носителей в зоне проводимости ультракоротким лазерным импульсом, позволяют получать данные о скоростях явлений и особенностях модели взаимодействия в данных материалах [1,2]. Необходимой компонентой в таком исследовании является надежная теоретическая модель, которая позволяет связать результаты измерений с искомыми характеристиками. В нашей научной группе развивается подход моделирования кинетики возбужденного состояния при помощи численного решения уравнения Больцмана. Ранее нами был разработан метод расчета интегралов столкновений с использованием дискретной импульсной решётки [3]. Практически доступные размеры решётки составляют до 64x64x64, что позволяет получать особенности распределения частиц с хорошим разрешением в импульсном пространстве [4].

В то же время существует класс задач, где необходимо использовать более высокую разрешающую способность – в том числе при оптическом возбуждении металлов и сверхпроводников. В данной работе представлены необходимые соотношения для численного моделирования электронного газа с высоким разрешением по энергии и импульсам. Используется кинетическое уравнение для функции распределения частиц с использованием непрерывного пространства импульсов. Параметрами уравнения являются скорость релаксации и недиагональные кинетические коэффициенты, зависящие от импульсов. Были получены замкнутые формулы в случае модели Зоммерфельда. В отличие от работы [5], удалось учесть зависимость от направления импульса. Для учёта кристаллической решётки был применён метод Монте-Карло.

Работа поддержана проектом НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

### *Список литературы*

1. Kusar P., Kabanov V.V. et al. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.101 (22). P. 227001.
2. Demsar J. // J. Low Temp. Phys. 2020. V.201. P.676
3. Kuznetsov I.O. and Kartsev P.F. // Phys. Rev. E. 2023. V.107. P.055304
4. Kartsev P.F. and Kuznetsov I.O. // J. Phys.: Condens. Matter. 2021. V.33. P.295601
5. Kabanov V.V. and Alexandrov A.S. // Phys. Rev. B. 2008. V.78 (17). P.174514.

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЛАКСАЦИИ ОПТИЧЕСКИ ВОЗБУЖДЕННЫХ НОСИТЕЛЕЙ В ГРАФЕНЕ ДЛЯ ЗАДАЧ БОЛОМЕТРИИ**

Представлены результаты численного моделирования кинетики неравновесного состояния в графене после поглощения одиночного оптического кванта.

P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **NUMERICAL STUDY OF RELAXATION PROCESS OF OPTICALLY EXCITED CARRIERS IN GRAPHENE FOR BOLOMETRIC APPLICATIONS**

We present the results of numerical simulation for the kinetics of no equilibrium state in graphene after absorption of single optical quantum.

В настоящее время ведутся исследования по созданию высокочувствительных однофотонных болометров на основе графена [1,2]. Для описания чувствительности и быстродействия таких приборов обычно пользуются диффузионным приближением – применяется уравнение теплопроводности и обсуждается время распространения горячего пятна. В то же время представляет интерес подробное описание кинетики возбуждений в графене на более коротких временах, т.е. до достижения равновесия в электронной и фононной системах.

В данной работе проводится подробное численное моделирование данной задачи при помощи созданной в группе библиотеки FLBE (Fast Library for Boltzmann Equation) [3] для расчета интегралов столкновений и моделирования кинетики с использованием дискретной импульсной решетки. Приведены результаты численного моделирования. Демонстрируются особенности процесса релаксации на стадиях электрон-электронного каскада и передачи энергии фононной подсистеме. Исследованы характерные времена процессов в зависимости от энергии поглощенного кванта и температуры подложки.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания FSWU-2023-0031).

### *Список литературы*

1. Yan, J., Kim, M.H., Elle, J. et al., Dual-gated bilayer graphene hot-electron bolometer. *Nature Nanotech* **7**, 472 (2012).
2. Caleb Fried et al., Performance limits due to thermal transport in graphene single-photon bolometers, arXiv: 2311.00228 [cond-mat.mes-hall].
3. Kuznetsov I.O. and Kartsev P.F. Method and computer library for calculation of the Boltzmann collision integrals on discrete momentum lattice // *Phys. Rev. E* **107**, 055304 (2023).

Ю.В. КИСЛИНСКИЙ<sup>1</sup>, Н.В. ДУБИЦКИЙ<sup>1</sup>, К.И. КОНСТАНТИНЯН<sup>1</sup>, И.Е. МОСКАЛЬ<sup>1</sup>,  
А.М. ПЕТРЖИК<sup>1</sup>, Г.А. ОВСЯННИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ШАДРИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский Физико-Технический институт, Долгопрудный, Россия

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ИРИДАТА СТРОНЦИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИИ НАПЫЛЕНИЯ

Получены тонкие пленки Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub> по технологиям лазерной абляции, распыления на постоянном токе и импульсного распыления. Зависимости сопротивлений от температуры аппроксимированы моделями термической активации и трехмерной проводимости с переменной длиной прыжка для Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub>. Вычислены энергии активации и радиусы локализации носителей заряда.

YU.V. KISLINSKIY<sup>1</sup>, N.V. DUBITSKIY<sup>1</sup>, K.Y. CONSTANTINIAN<sup>1</sup>, I.E. MOSCAL<sup>1</sup>,  
A.M. PETRZHİK<sup>1</sup>, G.A. OVSYANNIKOV<sup>1</sup>, A.V. SHADRIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kotelnikov IRE RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

## ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF IRIDATE THIN FILMS: DEPENDENCE ON DEPOSITION TECHNIQUE

Thin films of Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub> were obtained by pulsed laser deposition, DC cathode sputtering, and pulsed cathode sputtering. Thermal activation and three dimensional variable range hopping models approximated dependencies of resistivity versus temperature for Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub>. Activation energies and localization radii of charge carriers were calculated.

Иридат стронция Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub> (SIO4) – слабый ферромагнетик с сильным спин-орбитальным взаимодействием (СОИ). Получены переходы Джозефсона с барьерами из SIO4: YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>/ Sr<sub>2</sub>IrO<sub>4</sub>/Nb, с произведениями сверхтока на нормальное сопротивление до 100 μV[1]. Цель работы – воспроизводимость при напылении пленок SIO4.

Тонкие пленки SIO4 напылялись по трем технологиям: импульсное лазерное осаждение (PLD), распыление на постоянном токе (DCsputtering), распыление на импульсном токе (Pulsedsputtering). Рентгеновские измерения пленок методом  $\Theta/2\Theta$  показали эпитаксиальную структуру с с-параметры решетки 12.75 – 12.85 nm, близкими к табличному 12.9 nm. Толщины пленок  $t$  вычислены по методу Шерера [2]. Из толщин  $t$  получены удельные сопротивления  $\rho$ . Зависимости  $\rho$  от обратной температуры  $1/T$  показаны на рис 1. В модели термической активации (ТА) зависимость  $\rho(T) = \rho_0 \exp(\Delta E/2kT)$  [3]. Аппроксимацией в модели ТА получены энергии активации  $\Delta E$ : 200 meV, 70 meV и 25 meV для образцов, полученных PLD, DCsputtering и Pulsedsputtering - соответственно. В модели трехмерной проводимости с переменной длиной прыжка (VRH):  $\rho(T) = \rho_0 \exp[(T_0/T)^{1/4}]$ . Константа  $T_0$  обратно пропорциональна кубу радиуса локализации носителей заряда  $\alpha$ . Модель VRH применима выше температуры  $T_{VRH}$ , когда радиус прыжка  $r \approx \alpha(T_0/T)^{1/4}$  меньше толщины пленки  $t$  [3, 4]. Отсюда радиус локализации  $\alpha \approx t(T_{VRH}/T_0)^{-1/4}$ . Величины  $\alpha$ , вычисленные из зависимостей  $\rho(T)$  были 2 nm, 1 nm и 9 nm для технологий PLD, DC sputtering и Pulsed sputtering.

Пленки SIO4, полученные технологией Pulsed sputtering, имеют наибольший радиус  $\alpha \sim 10$  nm. В них должен наблюдаться наиболее сильный сверхпроводящий эффект близости, что и требуется для эффекта Джозефсона.

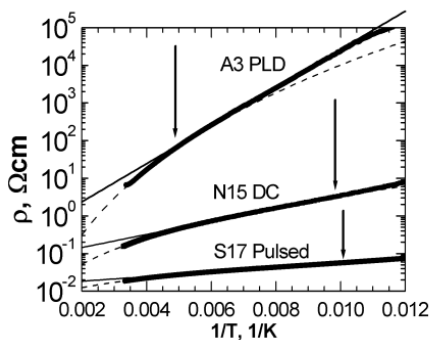


Рис. 1. Зависимости удельных сопротивлений от температуры для образцов, полученных по трем технологиям - точки. Аппроксимации по активационным зависимостям – сплошные линии. Расчеты для прыжковой зависимости VRH – пунктиры. Температуры перехода от одной зависимости к другой –  $T_{VRH}$  обозначены стрелками.

### Список литературы

1. Petrzhiĳ A.M., Constantinian K. Y, Ovsyannikov G.A. and others // PhysicalRev.B 2019.Vol. 100, P. 024501.
2. Patterson A. // Physical Rev. 1939. Vol. 56, No. 10, P. 978.
3. Yizi Xu, Ephron D., and Beasley M. R. // Physical Rev. B 1995. Vol. 52, P. 2843.
4. Kislinskii Yu. V., Constantinian K. Y., Moskal I. E. and others // Phys. of the Solid State 2022. Vol. 64, No 10, P. 1397.

А.В. КЛАУЗ<sup>1,2</sup>, С.В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, А.А. ХОМИЧ<sup>1,2</sup>, А.А. БОГАЧЁВ<sup>1,2</sup>, А.Г. ЗАЛУЖНЫЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ, Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe НА НАНОСТРУКТУРУ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЁННЫХ ОКСИДАМИ СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ И ПРОСВЕЧИВАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Исследована радиационная стабильность (при 100 сна 500°C) наноструктуры трёх ДУО сталей методом атомно-зондовой томографии и просвечивающей электронной микроскопии: Eurofer ODS, 10Cr ODS и KP-3 ODS с различными системами легирования. Установлено уменьшение объёмной плотности оксидных частиц и наноразмерных кластеров. Сделан вывод о радиационной стабильности данных сталей.

A.V.KLAUZ<sup>1</sup>, S.V.ROGOZHNIKIN<sup>1,2</sup>, A.A.KHOMICH<sup>1,2</sup>, A.A.BOGACHEV<sup>1</sup>, A.G.ZALUZHNYI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC «Kurchatov Institute» - KCTEP, Moscow, Russia

## STUDY OF THE INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE Fe ION IRRADIATION ON THE NANOSTRUCTURE OF DISPERSION-STRENGTHENED OXIDES STEELS WITH ATOM PROBE TOMOGRAPHY AND TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

The radiation stability (under 100 dpa and 500°C) of the nanostructure of three ODS steels was studied by atom-probe tomography and transmission electron microscopy: Eurofer ODS, 10Cr ODS and KP-3 ODS with different alloying systems. The change in number density of oxide particles and nanosize clusters was observed. A conclusion is made on the stability of these steels.

В перспективных ядерных и термоядерных реакторах материалы активной зоны должны обладать высокой радиационной стойкостью и жаропрочностью при температурах до 650°C и дозах до 200 сна (смещений на атом). Перспективными материалами, способными удовлетворить эти требования, являются дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали, содержащие в своей матрице однородно распределенные термически стабильные наноразмерные оксиды [1].

В данной работе рассматривались три ДУО стали 10Cr ODS, KP-3 ODS и Eurofer ODS в исходном состоянии и после облучения ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5,6 МэВ при температуре 500°C и повреждающих дозах до 100 сна. Исследование проводилось с использованием современных методов просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии [2].

В исходном состоянии сталей обнаружены оксидные включения и кластеры. Средний размер оксидов варьировался от 3 до 6 нм, их объёмная плотность составляла от  $2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$  до  $13 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ . Объёмная плотность кластеров варьировалась от  $16 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$  до  $32 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ , их средний размер от 2 до 4 нм [3].

Исследование, облучённых до 100 сна при 500°C образцов, показало существенное уменьшение объёмной плотности оксидных частиц в сталях 10Cr ODS (в ~ 5 раз) и KP-3 ODS (в ~ 4 раза) [4]. При этом в Eurofer ODS объёмная плотность оксидных частиц сохранилась в пределах разброса. Объёмная плотность кластеров резко уменьшилась только в Eurofer ODS, а в 10Cr ODS и KP-3 ODS наоборот выросла.

Комплекс исследований показал, что сталь Eurofer ODS также имеет стабильные оксидные частицы в области промежуточных температур эксплуатации за счёт взаимодействия подсистем кластеров и оксидов.

### Список литературы

1. B. Mouawad, X. Boulnat, D. Fabrègue, M. Perez, Y. de Carlan. Tailoring the microstructure and the mechanical properties of ultrafine grained high strength ferritic steels by powder metallurgy, Journal of Nuclear Materials, 465 (2015) 54-62
2. Michael K. Miller. Atom probe tomography // Review of Scientific Instruments. V.78. 2007. P. 031101.
3. С.В. Рогожкин, А.А. Хомич, А.А. Богачев, и.д. Имитационные эксперименты на пучках тяжелых ионов для моделирования радиационных повреждений конструкционных материалов активной зоны ядерных и термоядерных энергетических установок // Ядерная физика и инжиниринг. 2020. Т. 11. № 1. С. 22-31.
4. S. V. Rogozhkin, A. V. Klauz, A. A. Bogachev. et al. Influence of Fe Ion Irradiation at 500°C on the Nanostructure of Oxide Dispersion-strengthened Steels // Physics of Atomic Nuclei. 2022. V. 85. № 12. P. 1998-2006.

## МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ЧАСТИЦЫ НЕИЗВЕСТНОГО КОМПОНЕНТА В БЕЛКОВЫХ СМЕСЯХ ПО ДАННЫМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

Рассмотрены алгоритмы восстановления трехмерной формы частицы неизвестного компонента в белковых смесях по данным малоуглового рассеяния. Проведена реконструкция пространственной формы промежуточного комплексанативных белков адренодоксина и цитохрома С, подтверждающая случайно-столкновительный характер взаимодействия данных белков.

P.V. KONAREV, V.V. VOLKOV, A.E. KRYUKOVA, V.A. GRIGOREV, G.S. PETERS  
*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

## METHODS FOR PARTICLE SHAPE DETERMINATION OF AN UNKNOWN COMPONENT IN PROTEIN MIXTURES FROM SMALL ANGLE X-RAY SCATTERING DATA

Algorithms for reconstructing the three-dimensional particle shape of an unknown component in protein mixtures from small-angle scattering data are considered. The 3D shape reconstruction of the intermediate complex of native proteins of adrenodoxin and cytochrome C is performed, confirming the stochastic nature of the interaction of these proteins.

Малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) позволяет изучать биологические системы в наноразмерном диапазоне (от 1 до 200 нм) и изменения их структуры в зависимости от физико-химических условий среды (концентрация образца, температура, pH раствора, состав буферного раствора, и т.д.). Такие системы могут состоять из нескольких типов частиц (компонентов), что существенно затрудняет их анализ, поскольку стандартные методы восстановления формы частиц, разработанные для монодисперсных случаев, оказываются неприменимыми. Тем не менее, варьируя физико-химические условия, можно получить серию образцов, в которых компоненты имеют разные относительные концентрации, и измерить набор кривых МУРР от таких (родственных) смесей.

Ранее был разработан алгоритм, который путем анализа данных от набора родственных смесей позволяет восстанавливать форму частицы неизвестного промежуточного компонента и одновременно оценивать объемные доли всех компонентов для каждого образца в серии [1]. Восстановление трехмерной формы неизвестного компонента в виде шариковой модели (и соответствующей ему кривой рассеяния) проводится с помощью метода моделирования отжига [2]. При этом, нахождение кривой интенсивности неизвестного компонента сопровождается определением относительных концентраций всех компонентов для каждого измеренного образца путем решения системы линейных уравнений при теперь уже известных профилях рассеяния компонентов. Разработанная программа DAMMIX позволяет проводить анализ эволюционирующих или равновесных олигомерных систем, содержащих два или три компонента, один из которых неизвестен. Целевая минимизируемая функция содержит как общую невязку, рассчитанную по всему набору данных, так и штрафные слагаемые, гарантирующие, что форма частицы является компактной и связанной.

В данной работе программа DAMMIX была существенно модернизирована, в ней появилась возможность исследовать смеси частиц, содержащие четыре или пять компонентов, в которых один из компонентов неизвестен. Эффективность работы модифицированного алгоритма продемонстрирована на примере экспериментальных данных МУРР от нативного комплекса белков адренодоксина (Adx) и митохондриального цитохрома С (Cс) [3]. Восстановлена пространственная структура неполного промежуточного комплекса («тримера») по набору кривых МУРР, полученных в диапазоне концентраций от 2.4 до 24 мг/мл, которая подтверждает гипотезу о том, что нативный комплекс Adx/Cс является динамическим и образуется исключительно вследствие случайно-столкновительного характера взаимодействий белков. Показано, что для всех концентраций образца объемная доля тримеров значительна и варьируется в пределах от 30 до 70%, при этом в системе также присутствуют мономерные молекулы белков, и известные комплексы белков - гетеродимеры и гетеротетрамеры. Таким образом, было установлено, что образование гетеротетрамеров происходит именно через тримеры, а не посредством ассоциации двух гетеродимеров, что ожидалось бы в случае простой димеризации.

С помощью предложенного метода можно изучать многокомпонентные самоорганизующиеся системы, например, фермент люмазинсинтазу, образующую икосаэдрические капсулы разных типов в зависимости от pH раствора, состава буферного раствора и наличия мутаций вблизи активного центра фермента [4].

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

### *Список литературы*

1. Konarev P.V., Svergun D.I. // IUCrJ. 2018. Vol. 5, P. 402-409.
2. Manalastas-Cantos K., Konarev P.V., Hajizadeh N.R., Kikhney A. G., and others // J. Appl. Cryst. 2021. V. 54, P. 343-355.
3. Xu X., Reinle W., Hannemann F., Konarev P.V., and others // J. Am. Chem. Soc. 2008. Vol. 130, P. 6395-6403.
4. Zhang X., Konarev P.V., Petoukhov M.V., Svergun D.I., and others // J. Mol. Biol. 2006. Vol. 362, P. 753-770.

## ПОДАВЛЕНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНО ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Статья посвящена исследованию подавления многократного рассеяния положительно заряженных частиц с импульсом 180 ГэВ/с, проходящих через изогнутые монокристаллы кремния под малыми углами к плоскости (111) как в режиме каналирования, так и в надбарьерном состоянии.

A.M. KRUTOV, V.A. MAISHEEV, YU.A. CHESNOKOV, A.A. YANOVICH  
National Research Center «Kurchatov Institute»- IHEP, Protvino, Russia

## SUPPRESSION OF MULTIPLE SCATTERING OF POSITIVELY CHARGED PARTICLE IN SILICON SINGLE CRYSTAL

The article is devoted to the study of the suppression of multiple scattering of positively charged particles with a momentum of 180 GeV/c passing through bent silicon single crystals at small angles to the (111) plane, both in the channeling mode and in the above-barrier state.

Впервые эффект подавления многократного рассеяния наблюдался в 2019 году в ЦЕРНе в эксперименте UA9 при участии российских физиков [1]. Эксперимент был выполнен с использованием прецизионных координатных детекторов и специальных фокусирующих кремниевых монокристаллов. Изучались одномерные распределения рассеянных частиц в плоскости изгиба кристалла и в перпендикулярной к ней плоскости. Показано, что на одинаковой толщине среднеквадратичный угол рассеяния каналирующих частиц меньше в 8 раз соответствующего угла для надбарьерных частиц. В настоящей работе мы анализируем новые данные по многократному рассеянию частиц с импульсом 180 ГэВ/с. На основе недавней теории процесса [2] мы описываем поведение среднеквадратичных углов рассеяния частиц в диапазоне толщин монокристаллов от 3 до 5 см в различных модах прохождения частиц. Расчеты находятся в хорошем согласии с измерениями. Эти результаты дополняют полученные результаты на этом же монокристалле кремния, но выполненные при импульсе 400 ГэВ/с.

Анализ расчетов и экспериментальных данных для надбарьерных частиц демонстрирует эффект подавления на примерно 15% многократного рассеяния в плоскости перпендикулярной плоскости изгиба. Этот результат можно считать первым полным подтверждением эффекта, предсказанного В.Л. Любошицем и М.И.Подгорским в 1984 году [3].

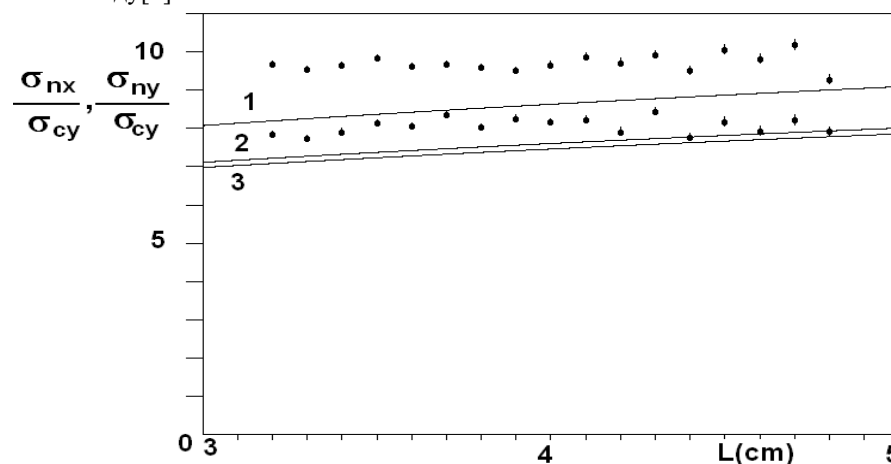


Рис. 1. Поведение отношения среднеквадратичного угла рассеяния надбарьерных частиц в двух взаимно перпендикулярных плоскостях к такому же углу для каналирующих частиц в зависимости от толщины кристалла L. Верхний ряд точек результаты эксперимента (самый верхний ряд в плоскости изгиба и пониже в перпендикулярной плоскости). Кривые 1,2,3 соответствующие расчеты (кривые 2 и 3 соответствуют нижним точкам и разным амплитудам тепловых колебаний атомов).

### Список литературы

1. W. Scandale, Yu.A. Chesnokov, V.A. Maisheev, A.A. Yanovich et. al. Eur. Phys. J. C (2019) 79:993; Eur. Phys. J. Plus (2022) 137:811.
2. A.M. Krutov, V.A. Maisheev Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1061 (2024) 169086.
3. V.L. Lyuboshitz and M.I. Podgoretskii Sov.Phys.JETP 60(3), September 1984.



В.О. КУВОНДИКОВ<sup>1</sup>, И.Р. БОЙНАЗАРОВ<sup>1</sup>, S. MINGLIANG<sup>2</sup>, Ш.К. НЕМАТОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Школа материаловедения и инженерии Китайский океанический университет, Циндао, Китай

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ПОГЛОЩЕНИЕ АКТИВНОГО СЛОЯ ОРГАНИЧЕСКОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОСНОВЕ БЕНЗОБИСТИАЗОЛА

В работе исследована объемная гетероструктурированная пленка активного слоя органического солнечного элемента, состоящая из низкомолекулярного донора на основе Бензобистиазола и безфуллеренового акцепторного полимера Y6. Изучено влияние термической обработки на спектр оптического поглощения, полученного тонкого активного слоя.

V.O.KUVONDIKOV<sup>1</sup>, I.R. BOYNAZAROV<sup>1</sup>, S. MINGLIANG<sup>2</sup>, S.K. NEMATOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>School of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, China

## INFLUENCE OF THERMAL ANNEALING ON THE ABSORPTION OF THE ACTIVE LAYER OF AN ORGANIC SOLAR CELL BASED ON BENZOBISTHIAZOLE

The work investigated a bulk heterojunction film of the active layer of an organic solar cell, consisting of a small molecular donor based on benzobisthiazole and a nonfulleren acceptor polymer Y6. The effect of thermal treatment on the optical absorption spectrum of the resulting thin active layer was studied.

Среди различных видов фотоэлектрических устройств органические солнечные элементы (ОСЭ) привлекают пристальное внимание исследователей из-за их низкой стоимости, простоты изготовления, а также способности интенсивно поглощать световую энергию в широкой области оптического спектра [1]. В настоящей работе получена объемная гетероструктурированная пленка активного слоя, используя метод спин-коутинга. Такая пленка изготовлена из низкомолекулярного донора на основе бензобистиазола и безфуллеренового акцепторного полимера Y6. Изучены спектры ее оптического поглощения до и после термической обработки.

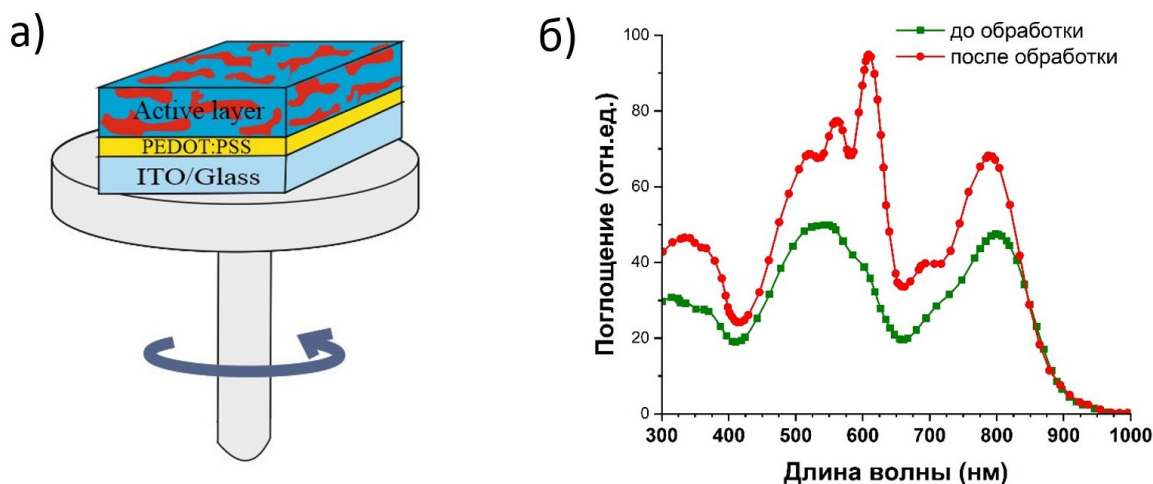


Рис. 1. а) – схема процесса получения пленки активного слоя, б) - спектры поглощения такой пленки до и после отжига.

Активный слой был изготовлен из донорно-акцепторной пары материалов в соотношении 1,6:1 с добавлением 0,8% хлорнафталина с последующим формированием пленки толщиной около 130 нм [2,3]. Результаты исследований показали, что отжиг активного слоя при 90°C в течение 10 минут резко увеличивает высоту пиков в спектре поглощения активного слоя и приводит к появлению интенсивных пиков «0-0». Кроме того, такая термическая обработка активного слоя приводит к «фиолетовому смещению» пика поглощения акцептора Y6 при 800 нм приблизительно на 10 нм. Показано, что подобный спектральный сдвиг связан с уменьшением агрегации акцептора Y6 и увеличением скорости генерации экситонов в активном слое.

### Список литературы

1. Sun, C., Pan, F., Bin, H. et al. // Nat Commun. 2018. Vol. 9, pp. 743.
2. Han, D., Wen, S., Bi, F., et al. // Chemical Engineering Journal 2023, Vol. 463, pp. 142400.
3. E.A. Zakhidov, M.A. Zakhidova, et al. // Journal of Applied Spectroscopy 2020, Vol. 87, Issue 3, pp. 464–470.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ХИГГСА В ОПТИЧЕСКОМ КРИСТАЛЛЕ**

Сообщается о наблюдении действия механизма Хиггса в оптическом кристалле: в монокристаллическом рубине  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{+3}$  поперечные световые волны, генерируемые внешним оптическим источником, приобретают дополнительные продольные степени свободы, участвующие в поляритонной бозе-эйнштейновской конденсации, внутри кристалла спонтанно нарушается симметрия калибровочного электромагнитного поля, а исходно безмассовые световые кванты приобретают ненулевую инертную массу, что регистрируется прямым наблюдением их центробежного сноса при вращении образца. Результаты открывают возможности для воспроизведения эффектов стандартной модели в условиях оптической лаборатории.

M.A.KULAGINA, V.V.FILATOV

*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia***HIGGS MECHANISM IN AN OPTICAL CRYSTAL**

The paper reports observation of the Higgs mechanism in an optical crystal: in a single-crystal ruby  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{+3}$ , the transverse electromagnetic waves acquire longitudinal extra-degrees of freedom to allow Bose-Einstein condensation for such polaritons, the symmetry of the gauge electromagnetic field becomes broken, and massless photons become massive polaritons registered by its centrifugal drift inside rotating sample. The results allow reproducing the effects of the Standard Model in an optical laboratory.

Механизм Хиггса – ключевая идея Стандартной модели физики элементарных частиц, разрешающая проблему спонтанного нарушения симметрии калибровочно-инвариантных полей. Так, согласно Хиггсу [1,2] (см. также работы [3,4]), изначально безмассовые частицы (бозоны Намбу-Голдстоуна, возникающие во всех теориях поля со спонтанно нарушенной симметрией) «приобретают» свою массу вследствие взаимодействия с некоторым скалярным полем  $\phi$  (полем Хиггса): безмассовый векторный бозон  $\psi$  «поглощает» безмассовое возбуждение  $\phi$ , формируя массивную частицу ( $\psi + \phi \rightarrow \Psi$ ). При этом в соответствующем калибровочном поле  $\Psi$  возникают дополнительные продольные степени свободы.

В данной работе сообщается о наблюдении действия хиггсовского механизма в условиях лабораторного эксперимента, где исследуемым калибровочным полем  $\psi$  было электромагнитное ( $\psi \equiv A_\mu$ ), а в качестве хиггсовского  $\phi$  выступало фонное поле кристаллической решётки прозрачного оптического кристалла (рубина).

Монокристаллический образец рубина  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{+3}$ , представлявший собой «таблетку» диаметром около сантиметра и толщиной несколько миллиметров, возбуждался излучением интенсивного источника света: как монохроматического (лазер, светоизлучающие диоды с линиями генерации в различных областях видимого спектра), так и широкополосного (галогенная лампа). Под воздействием оптической накачки в рубине наблюдалось формирование поляритонного конденсата Бозе-Эйнштейна на «лазерном» резонансе диэлектрической функции ( $\lambda \approx 694$  нм), соответствующем положению продольной оптической поляритонной моды ( $LO$ -моды). Развивалась индуцированная прозрачность материала в области поглощения [5], интерпретируемая нами как переход светового поля в состояние «сверхпроводимости» (с образованием двухполяритонных «куперовских» состояний [6]), что прямо указывает на спонтанное нарушение симметрии калибровочного электромагнитного поля внутри кристалла. Появление у световых квантов (поляритонов) ненулевой инертной массы подтверждалось результатами моделирования динамики поляритонов в рубине и наблюдалось в ходе прямого эксперимента в виде «центробежного» сноса лазерного луча (хорошо заметного в прозрачном образце) при быстром вращении таблетки вокруг своей оси (см. [7]).

Таким образом, поляритонные эффекты в оптических кристаллах позволяют воспроизвести и исследовать в лаборатории важнейшие эффекты Стандартной модели, выступая дополнением к исследованиям на коллайдерах. В частности, сингулярность плотности электромагнитных состояний поляритонного бозе-конденсата соответствует условиям ранней Вселенной и может использоваться для исследования процессов лептогенеза в низкоэнергетической области спектра, где ожидается присутствие лёгких аксионоподобных частиц.

*Список литературы*

1. Higgs P.W. // Phys. Lett. 1964. Vol. 12. P. 132-133.
2. Higgs P.W. // Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. P. 508-509.
3. Englert F., Brout R. // Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. P. 321-323.
4. Guralnik G.S., Hagen C.R. and Kibble T.W. // Phys. Rev. Lett. 1964. Vol. 13. 585-587.
5. Alimkina I.S., Gorelik V.S. and Filatov V.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1348. Art. 012081.
6. Волкова В.В., Филатов В.В. // Сборник тезисов конференции «ЛаПлаз-2024», направлено к опубликованию.
7. Гладышев В.О. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 104, № 3. С. 149-154.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ Zr/Nb ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ГЕЛИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИЗОХРОННОМ ОТЖИГЕ

Рассмотрены закономерности изменения физико-механических свойств и структурно-фазового состояния наноразмерных металлических систем Zr/Nb после облучения ионами гелия в зависимости от температуры при изохронном отжиге.

R.S. LAPTEV, A.D. LOMYGIN, ZH. WANG

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

## PATTERNS OF CHANGES IN PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL PHASE STATUS OF NANOSCALE METAL SYSTEMS Zr/Nb AFTER IRRADIATION WITH HELIUM IONS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE IN ISOCHRON ANNEALING

The patterns of changes in physical and mechanical properties and structural-phase state of nanoscale metallic systems Zr/Nb after helium ion irradiation as a function of temperature during isochronous annealing are considered.

Проблему быстрого радиационного охрупчивания конструкционных материалов предлагается решать с помощью материалов толщиной от нескольких до десятков нм, известных как наноразмерные многослойные системы, или «НМС» [1]. Благодаря своей способности устранять дефекты через интерфейсы, НМС демонстрируют замечательную устойчивость к повреждениям, вызванным радиацией [2] Мисра и др. [3] продемонстрировали, что межслойные контакты Cu/Nb препятствуют возникновению и распространению Непузырьков. Изготовление образцов наноразмерных металлических слоев НМС Zr/Nb проводилось методом магнетронного распыления. Многослойные покрытия были получены на специализированной установке, разработанной в НОЦ им. Вейнберга, ТПУ (Томск, Россия). Была подготовлена серия образцов НМС Zr/Nb с толщиной отдельных чередующихся слоев 50 нм. Общая толщина покрытия для всех образцов составила  $1,1 \pm 0,2$  мкм.

Микроструктура поперечного сечения НМС Zr/Nb облученных  $\text{He}^+$  с дозой  $1 \cdot 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup> после отжигов при температурах 100-300 °С существенно не изменяется. Наблюдается существенное возрастание внутренних напряжений, из-за которых в приповерхностной области появляются волнообразные искажения. Отжиг при 300 °С приводит к частичной релаксации напряжений, фазы  $\alpha$ -Zr и  $\beta$ -Nb сохраняются, а границы слоев остаются некогерентными. Послойный анализ ДУАЛ в НМС Zr/Nb 50 нм после облучения ионами гелия, показал, что отжиг 100-300 °С не оказывает заметного влияния на профили изменения относительных параметров  $S/S_0$  и  $W/W_0$  (Рис. 1).

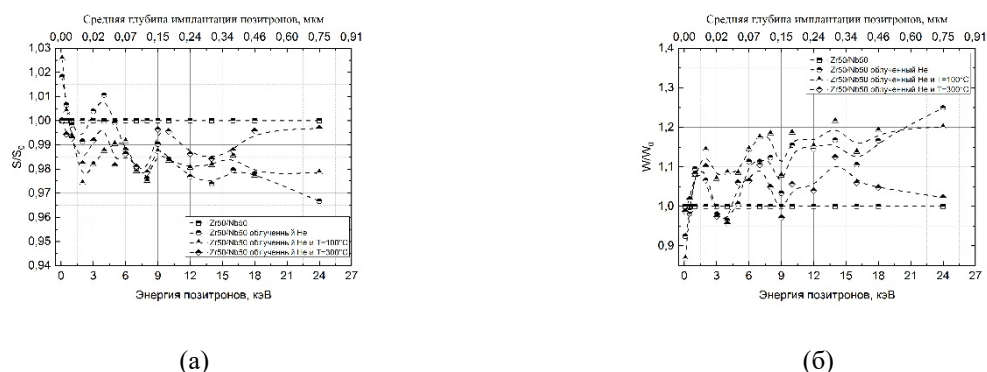


Рис. 1. Зависимости  $S/S_0$  (а) и  $W/W_0$  (б) позитронов переменной энергии в НМС Zr/Nb 50 нм после облучения ионами гелия и последующего отжига при различной температуре

S параметры имеют тенденцию к незначительному уменьшению ( $W \uparrow$ ) как в области высадки ионов, так и в более глубоких слоях. Превалирующий центр захвата позитронов не изменяется. При отжиге НМС Zr/Nb после облучения ионами гелия наблюдается лишь умеренная миграция и аннигиляция дефектов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 20-79-10343.

### Список литературы

1. Wang M., Beyerlein I. J., Zhang J. and others // Act. Mat. 2018. Vol. 160, P. 211-223.
2. Han W., Demkowicz M. J., Mara N. A. and others // Adv. Mat. 2013. Vol 25, № 48, P. 6975-6979.
3. Misra A., Demkowicz M. J., Zhang X. and others // Jom. 2007. Vol. 59, P. 62-65.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ Zr/Nb ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ПРОТОНАМИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИЗОХРОННОМ ОТЖИГЕ

Рассмотрены закономерности изменения физико-механических свойств и структурно-фазового состояния наноразмерных металлических систем Zr/Nb после облучения протонами в зависимости от температуры при изохронном отжиге.

R.S. LAPTEV, A.D. LOMYGIN, ZH. WANG  
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

## PATTERNS OF CHANGES IN PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL PHASE STATUS OF NANOSCALE METAL SYSTEMS Zr/Nb AFTER IRRADIATION WITH PROTONS AS A FUNCTION OF TEMPERATURE IN ISOCHRON ANNEALING

The patterns of changes in physical and mechanical properties and structural-phase state of nanoscale metallic systems Zr/Nb after protons irradiation as a function of temperature during isochronous annealing are considered.

Поскольку развитие человечества в настоящее время требует более прочных и долговечных конструкционных материалов для повышения безопасности, и увеличения срока службы, разработка новых радиационно-стойких материалов является важной проблемой. При интенсивном воздействии ионного излучения конструкционные материалы не должны быстро разрушаться благодаря современным радиационно-стойким материалам. Например, в металлах после облучения легкими ионами в результате ядерных столкновений может увеличиться соотношение точечных дефектов, таких как вакансии и включения, и скоплений дефектов, таких как пузырьки He [1,2]. Проблему быстрого радиационного охрупчивания конструкционных материалов предлагается решать с помощью наноразмерных многослойных систем (НМС) с некогерентными или полуккогерентными интерфейсами. Изготовление образцов НМС Zr/Nb проводилось методом магнетронного распыления. НМС были получены на специализированной установке, разработанной в НОЦ им. Вейнберга, ТПУ (Томск, Россия). Была подготовлена серия образцов НМС Zr/Nb с толщиной отдельных чередующихся слоев 50 нм. Общая толщина покрытия для всех образцов составила  $1,1 \pm 0,2$  мкм.

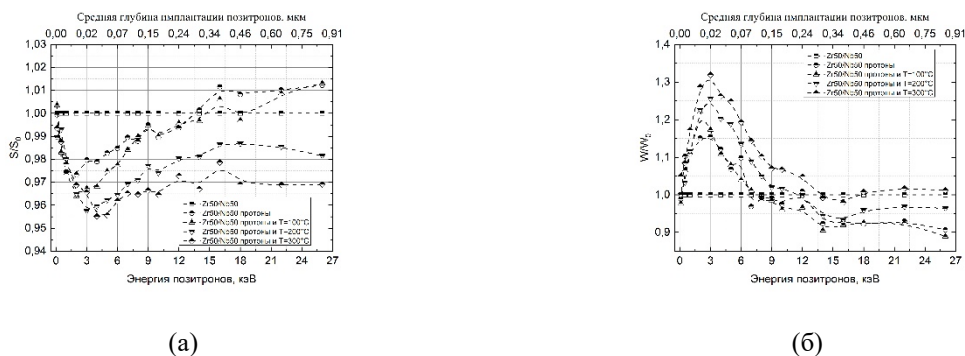


Рис. 1. Зависимости  $S/S_0$  (а) и  $W/W_0$  (б) позитронов переменной энергии в НМС Zr/Nb 50 нм после облучения протонами и последующего отжига при различной температуре

Послойный анализ ДУАЛ в НМС Zr/Nb 50 нм после протонного облучения и отжига при 100 °С показал, что происходит заметное изменение профиля относительных параметров  $S/S_0$  при энергии позитронов от 1 до 8 кэВ (20-100 нм), при этом значения  $W/W_0$  практически не изменяются (Рис. 1). Уменьшение  $S$  при постоянном  $W$  свидетельствует об уменьшении свободного объема при постоянном химическом окружении в месте аннигиляции. Вероятно, при отжиге 100 °С происходит лишь перестроение областей пониженной электронной плотности на границах раздела в зоне высадки протонов. Повышение температуры до 200 °С сопровождается уменьшением  $S$  параметров и увеличением  $W$  за счет интенсивного отжига дефектов не только в зоне высадки протонов, но и в более глубоких слоях. Нагрев до 300 °С стимулирует миграцию и аннигиляцию дефектов на интерфейсах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда № 20-79-10343.

### Список литературы

1. Zinkle S. J., Was G. S. // Act. Mat. 2013. Vol. 61, № 3, P. 735-758.
2. Daghbouj N., Li B. S., Callisti M., and others // Act. Mat. 2019. Vol 181, P. 160-172.

## ФОРМИРОВАНИЕ ГЕТЕРО-СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ WSe<sub>2</sub> В ЖИДКОСТИ ДЛЯ ФОТОКАТАЛИЗА ВОДОРОДА

Рассмотрены особенности формирования наночастиц при импульсной лазерной абляции мишени WSe<sub>2</sub> в жидких средах (изопропиловом спирте и дистиллированной воде). Установлены морфология, структурное и химическое состояние формируемых наночастиц и определены условия получения наночастиц с гетеропереходом WSe<sub>2</sub>/WO<sub>3</sub>, обуславливающим активирование процессов выделения водорода из кислотного раствора под воздействием видимого света.

D.E. LESNYKH, D.V. FOMINSKI, V.N. NEVOLIN, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKI  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FORMATION OF HETERO-STRUCTURED NANOPARTICLES BY PULSED LASER ABLATION OF WSe<sub>2</sub> IN LIQUID FOR HYDROGEN PHOTOCATALYSIS

The features of the formation of nanoparticles during pulsed laser ablation of a WSe<sub>2</sub> target in liquid media (isopropyl alcohol and distilled water) are considered. The morphology, structural and chemical state of the formed nanoparticles have been established and the conditions for obtaining nanoparticles with a WSe<sub>2</sub>/WO<sub>3</sub> heterojunction, which causes activation of the processes of hydrogen evolution from an acid solution under the influence of visible light, have been determined.

Развитие водородной энергетики во многом зависит от успешного решения проблемы разработки эффективных катализаторов расщепления воды. Требуются достаточно дешевые катализаторы, способные заменить дорогостоящие катализаторы из металлов платиновой группы. Исследования последних лет показали, что альтернативными катализаторами водорода являются наноструктурированные халькогениды переходных металлов (ХПМ). Лазерные методы получения таких наночастиц отличаются технологической простотой, экологичностью и универсальностью. Однако успешность применения методов во многом определяется пониманием механизмов формирования наночастиц с заданными характеристиками. Цель работы заключалась в проведении сравнительного исследования морфологии, структурного и химического состояния, а также каталитических свойств наночастиц, образующихся при импульсной лазерной абляции мишени WSe<sub>2</sub> в воде и изопропиловом спирте.

Лазерная абляция мишени WSe<sub>2</sub> проводилась импульсами наносекундной длительности, излучаемых лазером Solar LQ529. Пластины WSe<sub>2</sub> устанавливались на дно стакана, который заполнялся жидкостью. Размер формируемых наночастиц варьировался в интервале от 20 до 200 нм. Несмотря на схожую морфологию осажденных наночастиц, фазовый и химический состав наночастиц оказался различным (рис. 1 а и б). При лазерной абляции в воде химическое состояние наночастиц формировалось под влиянием процессов взаимодействия эрозийного факела с кислородом. Этот эффект проявлялся заметно слабее при взаимодействии эрозийного факела со спиртом. В результате в воде активно формировались наночастицы оксида вольфрама. В спирте в результате конкуренции процессов окисления, карбонизации и селенирования формировались гибридные наночастицы, содержащие наночастицы WSe<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>, W, W–Se–O. Селен мог выделяться в элементарном состоянии. Гибридные наночастицы, образующиеся при абляции в спирте, обладали достаточно хорошими фотоэлектрокаталитическими свойствами в реакции выделения водорода в кислотном растворе. Фототок (при нулевом потенциале) для каталитических пленок, полученных осаждением суспензии лазерно-аблированных наночастиц, превышал фототок для гибридных нанокатализаторов, полученных ранее последовательным осаждением фото-активных WO<sub>3</sub> и каталитически-активных MoS<sub>x</sub> слоев из лазерной плазмы в вакуумных условиях [1].

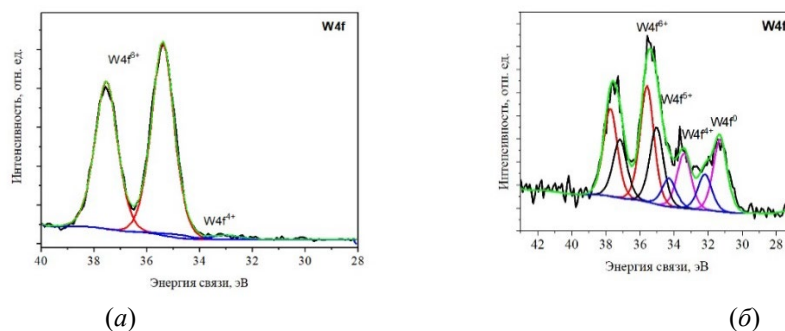


Рис. 1. Химическое состояние W в наночастицах, сформированных импульсной лазерной абляцией WSe<sub>2</sub> в (а) воде и (б) спирте.

### Список литературы

1. Fominski V., Gnedovets F., Fominski D., Romanov R. et al. // *Nanomaterials* 2019. Vol. 9. Iss. 10. art. 1395.

## РАСЧЕТ ОТКЛИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА НА ИМПУЛЬСЫ ТОКА МИКРОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ С УЧЕТОМ НАГРЕВА

Методом Монте-Карло (МК) в рамках двумерной модели слоистого ВТСП рассчитана напряженность электрического поля в образце при действии прямоугольного импульса тока, превышающего критический. В модель введен нагрев образца под действием протекающего тока. Расчеты сделаны при разной температуре и силе тока в импульсе, определены значения, при которых образец за время импульса не переходит в нормальное состояние.

A.N. MAKSIMOVA, S.V. POKROVSKII, A.N. MOROZ, I.A. RUDNEV, V.A. KASHURNIKOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF THE RESPONSE OF A HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR TO CURRENT PULSES OF MICROSECOND DURATION, TAKING INTO ACCOUNT HEATING

Calculated the electric field strength in the sample under the action of a rectangular current pulse exceeding the critical value was calculated using Monte Carlo method (MC) in the framework of a two-dimensional model of layered HTS. Heating of the sample under the action of a flowing current is introduced into the model. Calculations were made at different temperatures and current strengths in the pulse, and the values at which the sample does not return to normal during the pulse were determined.

Одной из важнейших характеристик сверхпроводника является его токнесущая способность. При этом, как показывает эксперимент, образец может выдерживать импульсный ток с амплитудой, в несколько раз (в ряде случаев и на порядок) превышающей критическую. При протекании через образец тока выше критического вихри Абрикосова приходят в движение к центру образца, в процессе этого движения выделяется энергия, приводящая к нагреву сверхпроводника.

В данной работе нами была численно рассчитана форма отклика образца на прямоугольный токовый импульс. Примем, что образец переходит в нормальное состояние и сгорает при достижении критической температуры. Преимуществом численного расчета в данном случае является отсутствие затрат на создание нового образца в случае его сгорания.

В рамках модели слоистого ВТСП напряженность электрического поля рассчитывается по формуле  $E=vB/c$ , где  $v$  – средняя скорость вихрей,  $B$  – поле в образце, обусловленное вихрями. Исходя из известных средней плотности тока в образце и его теплоемкости рассчитывается выделившееся тепло и приращение температуры в предположении, что отвода тепла нет. На рис. 1а показана зависимость напряженности от времени в случае, когда в процессе импульса достигается критическая температура. Форма импульса, показанного на рис. 1б, качественно согласуется с наблюдаемой в эксперименте [1]. Результаты расчета могут быть полезны при проектировании токоограничителей, а также при исследовании скачков магнитного потока в ВТСП.

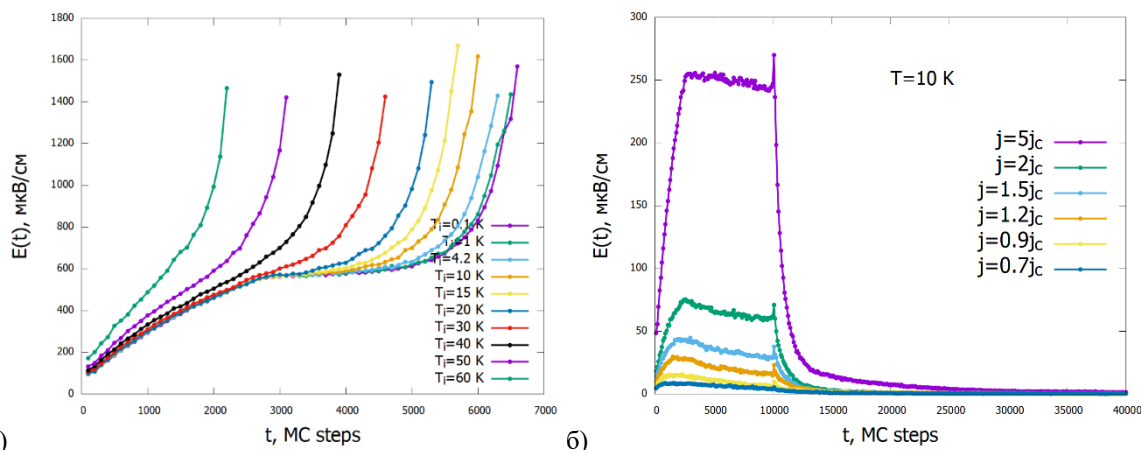


Рис. 1. Отклик образца на токовый импульс длительности  $10^4$  МК-шагов ( $\sim 10^{-4}$ с) и амплитуды  $10j_c$ . Образец достигает критической температуры (а), образец не достигает критической температуры (б).

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Список литературы

1. Leroux M. et al. //Physical Review Applied. 2019. Т. 11. №. 5. С. 054005.

А.Ю. МАЛЯВИНА<sup>1</sup>, И.В. МАРТИРОСЯН<sup>1</sup>, С.В. ПОКРОВСКИЙ<sup>1</sup>, И.А. РУДНЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОМПОЗИТНЫХ ВТСП ЛЕНТАХ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗКАХ

В данной работе представлены результаты исследования переходных процессов в высокотемпературных сверхпроводящих композитах под воздействием миллисекундных импульсов тока. Продемонстрирован режим устойчивого переключения сверхпроводника в нормальное состояние. Показана возможность многократного циклического переключения в условиях импульсной нагрузки без деградации образца.

A.Y. MALYAVINA<sup>1</sup>, I.V. MARTIROSIAN<sup>1</sup>, S.V. POKROVSKII<sup>1</sup>, I. A. RUDNEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PECULIARITIES OF DYNAMIC TRANSITIONS IN COMPOSITE HTS TAPES UNDER PULSE CURRENT LOADS

This paper presents the results of the study of transients in high-temperature superconducting composites under the influence of millisecond current pulses. The mode of stable switching of the superconductor to the normal state is demonstrated. The possibility of multiple cyclic switching under pulse loading conditions without degradation of the sample is shown.

Высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) используются в системах передачи и накопления энергии [1]. Создание термоиндуцированных динамических состояний (ТДС), приводящих к переходу сверхпроводника в нормальное состояние, позволяет применять композитный ВТСП ленты в таких устройствах, как ограничители тока [2] и ВТСП переключатели [3]. Такие устройства применяются в условиях низких напряжений и высоких токов и могут непосредственно являться элементами сверхпроводящей цепи. Исследование поведения сверхпроводника при импульсном токовом воздействии позволяет реализовывать условия близкие к условиям эксплуатации ВТСП переключателей и тестировать устройства при критических режимах токовой нагрузки без деградации.

В данной работе представлены результаты исследования поведения композитных ВТСП лент под воздействием импульсов тока миллисекундной (мс) длительности с амплитудой до 300 А. Время нарастания фронта импульса не превышает 30 мс. В качестве образцов, использовалась композитная ВТСП лента REBCO производства компании «С-Инновации» шириной 4 мм с критическим током 140 А при 77 К. В работе были реализованы два режима импульсной токовой нагрузки. В первом режиме токовый импульс создается при нулевом начальном токе, во втором режиме, начальный ток через образец составляет 0.8 Jc, такой режим позволяет имитировать поведение сверхпроводника в устройствах, например, переключателях. В результате исследования одиночных токовых импульсов было обнаружено три режима поведения сверхпроводника. Низкоомный режим соответствует амплитудам тока меньше 1.3 Jc, в этом режиме роста напряжения на образце не наблюдается. В интервале от 1.3Jc до 1.6 Jc наблюдается резистивный режим, на образце возникает напряжение и реализуется обратимое переключение сверхпроводника. При дальнейшем повышении транспортного тока происходит перегорание сверхпроводника.

При работе в резистивном режиме экспериментальные данные демонстрируют наличие задержки между началом импульса тока и возникновением напряжения, которая уменьшается с ростом амплитуды токового импульса.

Для анализа управляемого переключения и возможности управления процессами переключения ВТСП композитов была разработана модель коммутирующего устройства в среде COMSOL Multiphysics. Для верификации построенной модели использовались экспериментальные данные. Показано, что переходной процесс в таких режимах связан с термическими динамическими характеристиками режимов течения потока. На основе разработанной модели было реализовано циклическое переключение импульсами тока с нулевой и ненулевой рабочей точки сверхпроводника по току.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### Список литературы

1. Anand A., Gour A., Datta T. and others // Application J Supercond Nov Magn 2023, Vol. 36, P.1121–1131.
2. Riva N., Sirois F., Lacroix C. and others // Supercond. Sci. Technol. 2020, Vol. 33, P. 114008.
3. Michael P., Qu T., Voccio J. and others // IEEE Trans. Appl. Supercond, 2017, Vol.27, P. 1-5.

## **АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ШИРОКОГО СПЕКТРА СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ**

В рамках настоящей работы рассмотрены наиболее распространенные сеточные методы моделирования энергетических машин на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент второго поколения, в частности, сверхпроводниковые генераторы, индуктивные и кинетические накопители энергии. На основе сравнения результативности анализа динамики нестационарных магнитных, токовых и тепловых процессов в слоистых ВТСП композитах в Н, А, А- $J$  и А-Т-Н формулировках нестационарных уравнений Максвелла сделан вывод о научной обоснованности применения той или иной формулировки для расчета широкого спектра сверхпроводниковых устройств.

I.V. MARTIROSYAN, D.A. ALEXANDROV, S.V. POKROVSKY, A.N. MOROZ, I.A. RUDNEV  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF GRID METHODS FOR SIMULATING A WIDE RANGE OF SUPERCONDUCTING DEVICES**

Within the framework of this work, the most common grid methods for modeling energy machines based on high-temperature superconducting (HTS) tapes of the second generation are considered, in particular, superconducting generators, inductive and kinetic energy storage devices. Based on a comparison of the effectiveness of analyzing the dynamics of non-stationary magnetic, current and thermal processes in layered HTS composites in the H, A, A- $J$  and A-T-N formulations of Maxwell's non-stationary equations, a conclusion was made about the scientific validity of using one or another formulation for calculating a wide range of superconducting devices.

В рамках представленной работы рассматриваются сеточные методы моделирования перспективных энергетических машин на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) лент второго поколения, в частности, сверхпроводниковых генераторов, индуктивных и кинетических накопителей энергии. Наиболее релевантным подходом к моделированию сложных средне- и крупномасштабных ВТСП систем является применение сеточных численных методов [1]. В этом случае для описания электродинамического поведения сверхпроводников наиболее часто применяют численное решение уравнений Максвелла, которое, как правило, осуществляют либо с помощью конечно-разностного приближения, либо с использованием метода конечных элементов. Для конечно-элементного моделирования разработаны и апробированы различные формулировки уравнений Максвелла, наиболее распространенными из которых являются Н, А, А- $J$  и А-Т-Н [1-3] формализмы. Несмотря на то, что все эти формулировки равнозначны между собой, методики решения соответствующих дифференциальных уравнений в частных производных могут существенно различаться.

Целью настоящей работы является построение, верификация и оптимизация численных моделей, позволяющих в двусторонней связке выполнять анализ электродинамического и теплофизического поведения ленточных ВТСП композитов с учетом реальных параметров охлаждения системы и явным учетом движения источников магнитных полей и установление границ применимости предложенных подходов для моделирования сверхпроводниковых устройств. Решение связанных систем дифференциальных уравнений в частных производных выполнено методом конечных элементов в среде численного моделирования Comsol Multiphysics. Верификация численных моделей выполнена путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными данными, полученными с использованием сканирующей холловской магнитометрии для сверхпроводниковой системы с базовым набором внешних воздействующих факторов, характерных для элементов ВТСП генераторов, индуктивных ВТСП накопителей энергии и элементов кинетических ВТСП накопителей энергии. На основе сравнения результативности и эффективности разработанных моделей в Н, А, А- $J$  и А-Т-Н формализмах даны научно-обоснованные рекомендации по применению различных формулировок нестационарных уравнений Максвелла для анализа широкого спектра ВТСП устройств. Полученный набор расчетных методик позволяет провести комплекс численных исследований, направленных на разработку и оптимизацию сверхпроводниковых систем различного масштаба. Эта задача является одной из ключевых с точки зрения практического применения ленточных ВТСП композитов в магнитных и электрических системах, таких как ВТСП генераторы, кинетические и индуктивные ВТСП накопители энергии.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ

### *Список литературы*

1. Zhang M., Coombs T. A. 3D modeling of high-T<sub>c</sub> superconductors by finite element software // Superconductor Science and Technology. – 2012. – Т. 25, № 1. – С. 015009.
2. Zhang H., Zhang M., Yuan W. An efficient 3D finite element method model based on the T–A formulation for superconducting coated conductors // Superconductor Science and Technology. – 2017. – Т. 30, № 2. – С. 024005.
3. Ainslie M. D., Flack T. J., Hong Z., Coombs T. A. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. – 2011. – Т. 30, № 2. – С. 762-774.



И.В. МАРТИРОСЯН, Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, М.А. ОСИПОВ, С.А. КРАТ, И.А. РУДНЕВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ТОРОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА**

Разработана численная модель для расчета магнитных и механических характеристик сверхпроводящей системы тороидального магнитного поля сферического токамака. Проведена оптимизация геометрической формы катушек двенадцать-секционного токамака для достижения требуемых рабочих значений магнитного поля при различных температурах охлаждения сверхпроводящих элементов.

I.V. MARTIROSYAN, D.A. ALEXANDROV, M.A. OSIPOV, S.A. KRAT, I.A. RUDNEV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **SIMULATION OF MAGNETIC AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE SUPERCONDUCTING SYSTEM OF A TOROIDAL MAGNETIC FIELD OF A SPHERICAL TOKAMAK**

A numerical model has been developed to calculate the magnetic and mechanical characteristics of the superconducting system of the toroidal magnetic field of a spherical tokamak. The geometric shape of the coils of a twelve-section tokamak was optimized to achieve the required operating values of the magnetic field at different cooling temperatures of superconducting elements.

Применение высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в области управляемого термоядерного синтеза представляет собой эффективный метод для значительного увеличения тороидального магнитного поля в установках. Этот подход практически не имеет альтернативы в достижении сверхсильных и стабильных магнитных полей при сниженном энергопотреблении по сравнению с аналогичной системой на основе медных проводников [1]. Одной из перспектив развития конструкции действующей установки малого сферического токамака НИЯУ МИФИ является создание магнитной системы, обеспечивающей получение постоянного тороидального магнитного поля величины  $\sim 2$  Тл с использованием обмоток на основе высокотемпературных сверхпроводящих ленточных композитов. В настоящей работе представлена численная модель для расчета магнитных и механических характеристик системы тороидального магнитного поля токамака со сверхпроводящими соленоидами. Рассмотрены конфигурации с независимыми секциями D-образной формы, а также с 12-секционной конфигурацией неразрывного соленоида. Проведена оптимизация геометрической формы D-образных катушек токамака для достижения требуемых рабочих значений магнитного поля, транспортного тока при различных температурах охлаждения сверхпроводящих элементов. Моделирование выполнено методом конечных элементов с использованием пакета программного обеспечения Comsol Multiphysics. Анализ механических характеристик магнитной системы выполнен для импульсного и стационарного режимов работы сверхпроводящих соленоидов. Большое внимание уделяется выбору оптимальных типов токонесущих элементов для обеспечения эффективной и устойчивой работы токамака. Проведено сравнение магнитных и механических свойств галетных ВТСП кабелей, твистированных стопок ВТСП лент и CORC (Conductor on Round Core) кабелей. Установлено, что наиболее перспективной из рассмотренных является конфигурация, состоящая из непрерывной двенадцати-секционной катушки на основе сверхпроводящего CORC-кабеля.

Для оптимальной конфигурации сверхпроводящего соленоида проведен расчет распределений магнитного поля и механических напряжений в системе тороидального магнитного поля сферического токамака, установлена величина транспортного тока, необходимого для достижения требуемого магнитного поля в импульсном режиме работы. Установлено, что магнитное поле на краях обмотки превышает магнитное поле на оси тора в несколько раз, что означает подавление критического тока сверхпроводника при работе. На основе А-Тформализма в термодинамической связке проведен расчет потерь сверхпроводящего CORC-кабеля, функционирующего в соответствующем магнитном поле. Проведена оптимизация как самой магнитной системы (увеличение количества витков в одной секции, изменение числа слоёв и рядов CORC-кабеля, угла намотки ВТСП лент и др.), так и оптимизация режимов охлаждения и нагрузки. Показаны характерные времена работоспособности системы для достижения требуемых параметров тороидального магнитного поля в различных режимах охлаждения при импульсной и стационарной токовой нагрузке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00749.

### *Список литературы*

1. T.S. Lee et al. Optimal design of a toroidal field magnet system and cost of electricity implications for a tokamak using high temperature superconductors, *Fusion Engineering and Design*, Vol 88-89, October 2015, Pages 1072-1075.

Ш. МАТНАЗАРОВА, М. ИСАКЖАНОВА, У. ХАЛИЛОВ, М. ЮСУПОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова, АН РУз, Ташкент, Узбекистан*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭНДОЭДРАЛЬНЫХ АТОМОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНОВ

Несмотря на то, что молекулы фуллеренов представляют большой интерес благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам, они имеют относительно низкую полярность в воде, что не позволяет использовать их для биологических применений. Поэтому в данной работе повышение растворимости (гидрофильности) фуллеренов в воде осуществляется посредством моделирования на атомном уровне, что помогает преодолеть препятствие на пути их использования в биологических приложениях.

SH. MATNAZAROVA, M. ISAKJANOVA, U. KHALILOV, M. YUSUPOV

*Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, AS Uz, Tashkent, Uzbekistan*

## COMPUTER SIMULATION OF THE IMPACT OF ENDOHEDRAL TRANSITION METAL ATOMS ON THE HYDROPHILIC PROPERTIES OF FULLERENES

Despite the fact that fullerene molecules are of great interest due to their unique physical and chemical properties, they have a relatively low polarity in water, which prevents their use for biological applications. Therefore, in this work, increasing the solubility (hydrophilicity) of fullerenes in water is carried out through atomic level modeling, which helps to overcome the obstacle to their use in biological applications.

Фуллерены обладают уникальными электронными свойствами, которые делают их привлекательными кандидатами для применения в электронике, диагностике и терапии [1]. Чистые фуллерены  $C_{60}$  из-за их низкой растворимости в воде при контакте с нейтральной водой образуют агрегаты фуллеренов, часто известные как «нано- $C_{60}$ ». Nano- $C_{60}$  обладают высокой цитотоксичностью из-за своих сильных окислительных свойств, что приводит к некрозу клеток [2]. В результате, чтобы сделать структуры водорастворимыми, к их поверхности добавляют функциональные группы или вводят в фуллерен атомы посторонних металлов (т.е. фуллерен с эндоэдральными атомами металлов). Тем не менее комплексных исследований влияния эндоэдральных атомов металлов на гидрофильные свойства фуллеренов недостаточно.

В данной работе мы исследовали, как присутствие эндоэдральных атомов переходного металла (ПМ) влияет на гидрофильность фуллерена с помощью моделирования реактивной молекулярной динамики (МД). В частности, мы исследовали модельные системы, включающие фуллерен  $C_{60}$  с одним эндоэдральным атомом переходного металла (например, железа, никеля, титана и кобальта), как показано на рисунке 1.

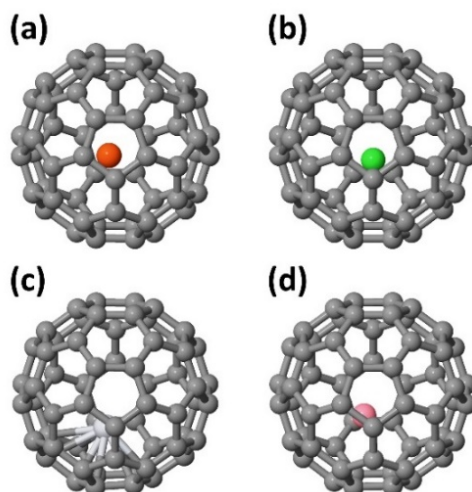


Рис. 1. Фуллерен  $C_{60}$  с эндоэдральным атомом ПМ, Fe (a), Ni (b), Ti (c) и Co (d).

Полученные предварительные результаты МД показали, что введение эндоэдральных атомов Fe, Ni, Co и Ti в фуллерен  $C_{60}$  увеличивает его свободную энергию сольватации по сравнению с чистым фуллереном. В результате этого увеличивается его способность взаимодействовать с водой (его гидрофильность), что может привести к снижению его вредного воздействия на биологические организмы.

### Список литературы

1. Panwar N. and others // Chem. Rev. 2019. Vol. 119, № 16. P. 9559–9656.
  2. Isakovic A. and others // Toxicol. Sci. 2006. Vol. 91, № 1. P. 173–183.
- У.К. МАХМАНОВ<sup>1,2</sup>, Ш.А. ЭСАНОВ<sup>1</sup>, К.Н. МУСУРМОНОВ<sup>1</sup>, Б.А. АСЛОНОВ<sup>1</sup>, А.Х. ШУКУРОВ<sup>1</sup>,

А. ОЛИМОВ<sup>1</sup>, Т.А. ЧУЛИЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана, Узбекистан, Ташкент

<sup>3</sup>Гулистанский государственный университет, Узбекистан, Гулистан

## ПОЛУЧЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕРОМ НАНОТРУБОК ФУЛЛЕРЕНА C<sub>60</sub>

Изучены особенности зарождения и дальнейшего роста наноструктурированных трубок на основе фуллерена C<sub>60</sub> при испарении капли раствора C<sub>60</sub> в смеси растворителей «бензол-изопропиловый спирт», расположенной на плоской поверхности подложки. Определены морфологические и размерные характеристики полученных нанотрубок фуллерена C<sub>60</sub>. Выявлены особенности управления геометрическими размерами синтезируемых нанотрубок C<sub>60</sub>.

U.K. MAKHMANOV<sup>1,2</sup>, S.A. ESANOV<sup>1</sup>, K.N. MUSURMONOV<sup>1</sup>, B.A. ASLONOV<sup>1</sup>, A. SHUKUROV<sup>1</sup>,  
A. OLIMOV<sup>1</sup>, T.A. CHULIEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent

<sup>2</sup>National University of Uzbekistan, Uzbekistan, Tashkent

<sup>3</sup>Gulistan State University, Uzbekistan, Gulistan

## PREPARATION AND SIZE CONTROL OF C<sub>60</sub> FULLERENE NANOTUBES

The features of the nucleation and further growth of nanostructured tubes based on C<sub>60</sub> fullerene upon evaporation of a drop of a C<sub>60</sub> solution in a mixture of benzene-isopropyl alcohol solvents located on a flat substrate surface have been studied. The morphological and dimensional characteristics of the obtained C<sub>60</sub> fullerene nanotubes were determined. Features of controlling the geometric dimensions of synthesized C<sub>60</sub> nanotubes have been revealed.

В настоящее время растущий спрос на наноструктурированные материалы для использования в различных областях нанотехнологии возродил интерес к изучению синтеза новых наноматериалов из молекул фуллеренов (C<sub>60</sub>, C<sub>70</sub>). Сферическая углеродная молекула C<sub>60</sub> с высокой симметрией  $I_h$  имеет сферическую оболочку толщиной ~0.1 нм, радиус молекулы составляет ~0.36 нм [1]. Фуллерен C<sub>60</sub> представляет собой полупроводник с шириной запрещенной зоны ~1.85 эВ. Большой интерес к одномерным фуллереновым наноструктурам, в частности нанотрубкам, обусловлен их практическим применением в качестве быстродействующих оптических устройств, наносенсоров, биочипов и высокопрочных наноструктурированных полупроводниковых чувствительных элементов [2].

Целью данной работы является исследование особенностей зарождения и установление физических механизмов роста нанотрубок на основе фуллерена C<sub>60</sub> при испарении капли его раствора. В работе использованы порошки фуллерена C<sub>60</sub> (Sigma-Aldrich, США), а также органические растворители – бензол (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>) марки «ч.д.а.» и изопропиловый спирт (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O) марки «х.ч.» от Sigma-Aldrich (США).

Морфологические и размерные характеристики полученных нанотрубок фуллерена C<sub>60</sub> изучены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В наших экспериментах большую роль в формировании нанотрубок на основе фуллерена C<sub>60</sub> играет градиент температуры, который возникает при резком охлаждении поверхностного и приповерхностного слоев капли фуллерена C<sub>60</sub> в результате интенсивного испарения органических растворителей (бензол и изопропиловый спирт в объемной фракции 0.8:0.2, соответственно). Наружный и внутренний диаметры полученных нанотрубок составляют ~650÷900 нм и ~425÷680 нм, соответственно. Средняя длина полученных нанотрубок составляет ~780÷1500 нм. Можно отметить, что на одном конце полученные нанотрубки фуллерена C<sub>60</sub> закрыты.

Показано, что геометрическими размерами и морфологией синтезированных нанотрубок можно управлять как за счет изменения начальной концентрации раствора фуллерена, так и за счет изменения температуры используемой подложки. Проведены селективные получения наноструктурированных фуллереновых нанотрубок.

Учитывая, что нанотрубки C<sub>60</sub> способны хорошо поглощать водные и спиртовые растворы различных наночастиц, это открывает потенциальные возможности использования фуллереновых нанотрубок C<sub>60</sub> в медицине для адресной доставки различных лекарственных препаратов в клетки, в качестве контейнера для наножидкостей в энергетике, а также в качестве насыщающихся поглотителей энергии удара в электромеханике.

Таким образом, результаты нашей работы могут быть использованы для прогнозирования и контроля геометрических размеров наноструктурированных трубок, которые имеют большой потенциал в таких приложениях, как медицина, нелинейная оптика и электромеханика, нано- и микроэлектроника, солнечная энергетика.

### Список литературы

1. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Ertz D. // Lithuanian Journal of Physics, 2020, Vol. 60, No. 3, pp. 194–204.
2. Makhmanov U.K., Kokhkharov A.M., Bakhramov S.A., Esanov S.A. // Romanian Journal of Physics, 2022, Vol. 67, No. 1-2, pp. 601 (1-9).

У.К. МАХМАНОВ<sup>1,2</sup>, Б.А. АСЛОНОВ<sup>1</sup>, Ш.А. ЭСАНОВ<sup>1</sup>, К.Н. МУСУРМОНОВ<sup>1</sup>,  
А.Х. ШУКУРОВ<sup>1</sup>, З. БЕКМУРОДОВ<sup>1</sup>, Т.А. ЧУЛИЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий, Академии наук Республики Узбекистан, Ташкент

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана, Узбекистан, Ташкент

<sup>3</sup>Гулистанский государственный университет, Узбекистан, Гулистан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИРОДЫ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В РАСТВОРАХ ФУЛЛЕРЕНА C<sub>70</sub>

Представлены результаты экспериментов по изучению свойств самоорганизации молекул фуллерена C<sub>70</sub> в бинарной смеси ксилол/тетрагидрофуран методами оптического поглощения, рефрактометрии и динамического рассеяния света. Полученные результаты подтверждают образование нанокластеров молекул C<sub>70</sub> в бинарной системе растворителей (ксилол/ тетрагидрофуран). Установлено, что степень межмолекулярного взаимодействия в растворе C<sub>70</sub>/ксилол/ тетрагидрофуран зависит от исходной концентрации фуллерена и времени выдержки раствора.

U.K. MAKHMANOV<sup>1,2</sup>, B.A. ASLONOV<sup>1</sup>, S.A. ESANOV<sup>1</sup>, K.N. MUSURMONOV<sup>1</sup>,  
A. SHUKUROV<sup>1</sup>, Z. BEKMURODOV<sup>1</sup>, T.A. CHULIEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent

<sup>2</sup>National University of Uzbekistan, Uzbekistan, Tashkent

<sup>3</sup>Gulistan State University, Uzbekistan, Gulistan

## STUDY OF THE NATURE OF INTERMOLECULAR INTERACTIONS IN SOLUTIONS OF FULLERENE C<sub>70</sub>

The results of experiments on studying the properties of self-organization of C<sub>70</sub> fullerene molecules in a binary xylene/tetrahydrofuran mixture using optical absorption, refractometry, and dynamic light scattering methods are presented. The results obtained confirm the formation of nanoclusters of C<sub>70</sub> molecules in a binary solvent system (xylene/tetrahydrofuran). It has been established that the degree of intermolecular interaction in a C<sub>70</sub>/xylene/tetrahydrofuran solution depends on the initial concentration of fullerene and the holding time of the solution.

В настоящее время внимание ученых всего мира сосредоточено на изучении характеристик наночастиц различной природы, синтезе на их основе наноструктурированных функциональных материалов, а также возможности использования их в качестве перспективных материалов для различных приложений [1]. К числу наиболее изученных в настоящее время семейств молекул фуллеренов относится молекула C<sub>70</sub>, структура которой соответствует клеточной кольцевой структуре, напоминающей мяч для регби. Благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам фуллерен C<sub>70</sub> имеет широкий спектр применения в качестве основных строительных наноблоков в нанотехнологиях, электромагнитных устройствах, солнечных панелях, сенсорах, фармацевтических препаратах, трибологических материалах и т. д. [2-3]. Понимание самоорганизации молекул C<sub>70</sub> в растворах необходимо для синтеза на их основе наноструктурированных материалов с новыми свойствами. В то же время многие вопросы о межмолекулярных взаимодействиях, приводящих к кластеризации молекул фуллерена C<sub>70</sub> в бинарных растворах, остаются дискуссионными.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование оптических свойств (УФ-видимые спектры поглощения и показатель преломления) растворов фуллерена C<sub>70</sub> в бинарных смесях растворителей ксилол/тетрагидрофуран и размерных характеристик (данные динамического рассеяния света) нанокластеров C<sub>70</sub> в растворах при комнатной температуре. В экспериментах были использованы кристаллические порошки фуллерена C<sub>70</sub> чистотой >99,5%, а также органические растворители – ксилол и тетрагидрофуран чистотой ~99%.

Методом рефрактометрии установлено, что с ростом концентрации C<sub>70</sub> в растворе увеличение числа связей между молекулами «C<sub>70</sub>-C<sub>70</sub>» и «C<sub>70</sub>-растворитель» приводит к увеличению показателя преломления растворов. При хранении раствора C<sub>70</sub>/ксилол/тетрагидрофуран фиксированной концентрации при комнатной температуре вначале наблюдается увеличение показателя преломления раствора, но дальнейшем хранении раствора (в период 3-9 суток) начинается его снижение. Последнее связано с увеличением размеров синтезируемых нанокластеров C<sub>70</sub> с течением времени и, как следствие, уменьшением их количества в растворе.

Методом оптической спектроскопии показано, что особенности спектра оптического поглощения смеси C<sub>70</sub>/ксилол/тетрагидрофуран при фиксированной низкой концентрации фуллерена чувствительны к времени его хранения. Методом динамического рассеяния света установлено, что время начала образования нанокластеров C<sub>70</sub> и их конечный размер зависят от концентрации фуллерена и времени выдержки раствора. Полученные научные результаты могут быть использованы для оценки формирования различных наноструктур в бинарных растворах фуллеренов и подобных им наночастиц.

### Список литературы

1. Fabbiani M., Cesano F., Pellegrino F., Negri Ch. // *Molecules*, 2021, 26, 7097A.
2. Sachdeva Sh., Singh D., Tripathi S.K. // *Opt. Mater.* 2020, 101, 109717.
3. Makhmanov U.K., Esanov S.A., Sidigaliyev D.T., Musurmonov K.N., Aslonov B.A., Chuliev T.A. // *Liquids*, 2023, 3, 385-392.

К. МЕХМОНОВ<sup>1</sup>, А. ЭРГАШЕВА<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## ПОНИМАНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО РОСТА ЭНДОЭДРАЛЬНОЙ ГРАФЕНОВОЙ НАНОЛЕНТЫ

Обширные исследования нетрадиционных методов направлены на получение графеновых нанолент внутри одностенных углеродных нанотрубок. Однако управление каталитическим синтезом с использованием точно контролируемого края наноленты внутри нанотрубок остается проблемой. В этом исследовании используется моделирование молекулярной динамики, чтобы понять формирование графеновых нанолент с точной краевой структурой путем настройки катализаторов и типов прекурсоров.

К. МЕХМОНОВ<sup>1</sup>, А. ЭРГАШЕВА<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## UNDERSTANDING SELECTIVE GROWTH OF ENDOHEDRAL GRAPHENE NANORIBBON

Extensive research into unconventional methods is aimed at producing graphene nanoribbons inside single-walled carbon nanotubes. However, controlling catalytic synthesis using a precisely controlled nanoribbon edge inside nanotubes remains a challenge. This study uses molecular dynamics simulations to understand the formation of graphene nanoribbons with precise edge structures by tuning catalysts and precursor types.

Графеновые наноленты (ГНЛ) сильно зависят от своей структуры края [1], и исследователи используют различные техники для регулирования этой структуры в процессе синтеза. В рамках нестандартных подходов активно исследуется синтез ГНЛ внутри одностенных углеродных нанотрубок (УНТ) [2, 3]. Однако достижение каталитического синтеза эндоедральных ГНЛ с точно контролируемой структурой края остается сложной задачей [4]. В данном исследовании используются моделирование молекулярной динамики (МД) для понимания процесса синтеза ГНЛ с четко определенными структурами краев, используя катализаторы (кластеры никеля) и различные прекурсоры (молекулы уксусной кислоты и метанола). Предварительные результаты подтверждают возможность контроля хиральности ГНЛ в зависимости от типа прекурсоров и эндоедрального катализатора. В данном контексте с использованием молекул уксусной кислоты и метанола соответственно синтезируются 4-hGNR с четкой структурой края и (3,1)-hGNR с некоторыми дефектами (рис. 1a, b). Кроме того, полученные результаты указывают на то, что кинетика роста ГНЛ различается в зависимости от типа прекурсора (рис. 1c). В целом, данное исследование способствует лучшему пониманию влияния прекурсоров на каталитический синтез эндоедральных графеновых нанолент с контролируемой структурой краев.

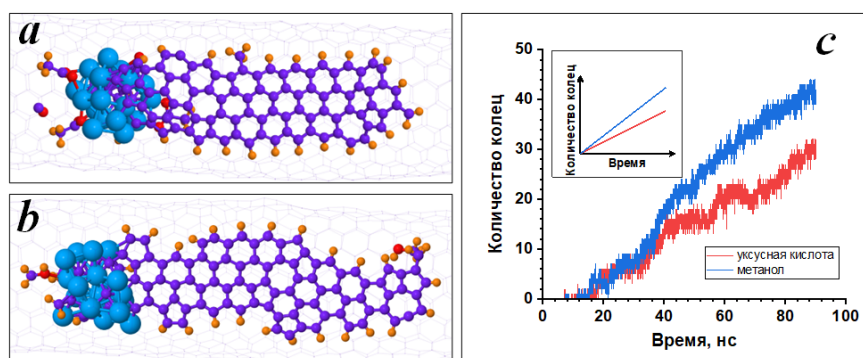


Рис. 1. ГНЛ каталитически синтезированы в ОУНТ с использованием (а) уксусной кислоты и (b) метанола. (с) Скорость роста эндоедральных ГНЛ в обоих случаях прекурсоров

### Список литературы

1. C. Tian et al., *Reviews in Physics* 10, 100082 (2023).
2. В. Милотти и др., *Малые методы* 6, 2200110 (2022).
3. J. Li et al., *ACS Nano* 14, 1895 (2020).
4. У. Халилов и др., *Carbon* 171, 72 (2021)

А.А. МИХАЙЛОВ, А.Н. МАКСИМОВА, А.Н. МОРОЗ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ГЕНЕРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СХЕМЕ КОРБИНО ДЛЯ ВТСП

Методом Монте-Карло рассчитаны вольт-амперные характеристики сверхпроводящего диска в рамках двумерной модели слоистого ВТСП при подаче тока по схеме Корбино при постоянном внешнем магнитном поле в 1000 Э. Получена напряжённость на нескольких соосных кольцах образца и выведен критический ток для трёх диаметров. Исследовано влияние концентрации точечных дефектов и температуры на скорость движения вихрей Абрикосова.

A.A. MIKHAILOV, A.N. MAKSIMOVA, A.N. MOROZ

NationalResearchNuclearUniversityMEPhI (MoscowEngineering Physics Institute), Moscow, Russia

## VOLTAGE GENERATION IN THE CORBINO MODEL FOR HTS

Volt-ampere characteristics of a superconducting disc within the framework of a two-dimensional model of layered HTSP under Corbino current supply at a constant external magnetic field of 1000 Gs have been calculated by the Monte Carlo method. The electric field strength on several coaxial rings of the sample is obtained and the critical current for three diameters is derived. The influence of the concentration of point defects and temperature on the velocity of Abrikosov vortices is investigated.

Схема Корбино (рис. 1) представляет собой точечный токовый контакт с одной стороны и протяжённый по всей внешней окружности образца с другой. Она позволяет равномерно распределять ток в радиальных направлениях. При наличии перпендикулярного внешнего магнитного поля возникает сила Лоренца, заставляющая сверхпроводящие вихри двигаться по кругу. Их движение генерирует напряжение, которые можно измерять и считать. Такое исследование позволяет определять свойства материала, причём не только сверхпроводящего. В работе [1] моделируется возможность использования схемы для выпрямления теплового потока. В [2] схема применена для измерения вязкости графена. Довольно перспективным выглядит применение подобных устройств для переноса тепла, которые рассмотрены в [3].

Методом Монте-Карло рассчитывали скорости движения Абрикосовских вихрей для соосных колец с толщиной, равной магнитной длине. Плотность тока задаётся в центре диска в круге с диаметром порядка десяти длин корреляции ВТСП. Моделирование выполнено для  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ .

Проведено сравнение генерируемого напряжения в трёх различных по диаметру микронных сверхпроводящих дисках, при трёх концентрациях точечных дефектов, глубина которых ограничивает пиннинг одним вихрем. Также получены результаты для нескольких далёких от критических температур.

Из полученных расчётов выделены критические токи внутренних колец по напряжённости в 1 мкВна см.

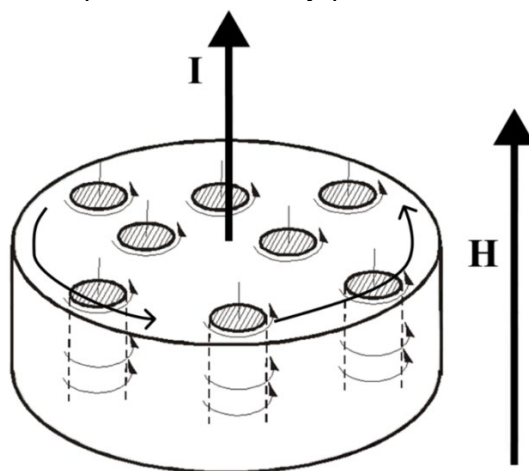


Рис. 1. Моделируемая схема Корбино в ВТСП

Исследование выполнено при поддержке программы НИЯУ МИФИ «Приоритет-2030».

### Список литературы

1. Zou Z. et al. Rectification of heat current in Corbino geometry //arXiv preprint arXiv: 2312.13610. – 2023.
2. Gall V., Narozhny B. N., Gornyi I. V. Corbino magnetoresistance in neutral graphene //Physical Review B. – 2023. – Т. 107. – №. 23. – С. 235401.
3. Mateos J. H. et al. Thermoelectric cooling properties of a quantum Hall Corbino device //Physical Review B. – 2021. – Т. 103. – №. 12. – С. 125404.

## АДСОРБЦИЯ АЗОТА НА ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБКАХ ПРИ РАЗНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Это исследование способствует лучшему пониманию механизмов, регулирующих адсорбцию азота на ДУНТ при различных температурах.

SH.A. MUMINOVA<sup>1</sup>, A.N. ULUKMURADOV<sup>2</sup>, I.D. YADGAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science,

<sup>2</sup>Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Uzbekistan

## NITROGEN ADSORPTION ON DOUBLE-WALLED CARBON NANOTUBE AT DIFFERENT TEMPERATURES

This study contributes to a better understanding of the mechanisms governing nitrogen adsorption onto DWNTs at different temperatures.

Двустенные углеродные нанотрубки (ДУНТ) привлекли значительное внимание благодаря их улучшенной стабильности и механическим свойствам [1]. Взаимодействие ДУНТ с другими атомами и молекулами, в частности с бором (B), азотом (N), кальцием (Ca), палладием (Pd) и платиной (Pt) интенсивно изучались в последние годы [2]. В этом исследовании мы исследуем механизмы хемосорбции атомов N на ДУНТ при различных температурах с использованием моделирования молекулярной динамики (МД)

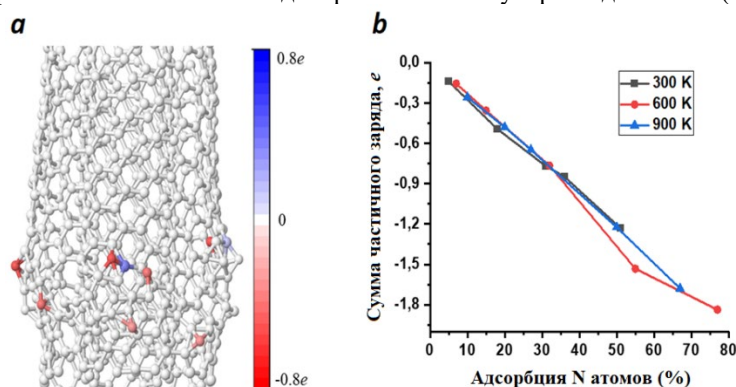


Рис. 1. (а) Атомы азота, хемосорбированные на ДУНТ, (б) Изменение парциального заряда адсорбированных атомов азота в зависимости от температуры.

Хемосорбция атомов азота на ДУНТ зависит от множества факторов, таких как кривизна поверхности нанотрубок, расположение шестичленных углеродных колец и другие [3]. Помимо этих эффектов, в УНТ атом углерода имеет более высокое значение электроотрицательности ( $\chi=2,55$ ) по сравнению с атомом азота ( $\chi=3,04$ ). Эта разница в электроотрицательности приводит к таким взаимодействиям, как кулоновские силы, между поверхностью УНТ и атомами азота. Это, в свою очередь, приводит к относительно более сильному взаимодействию между атомами азота и атомами углерода на поверхности ДУНТ, что приводит к более высокой адсорбции атомов азота на ДУНТ. В результате сумма максимальных парциальных зарядов атомов углерода и азота соответственно  $1,23e$  и  $-1,23e$  (51 %) для 300 К,  $1,84e$  и  $-1,84e$  (77 %) для 600 К,  $1,67e$  и  $-1,67e$  (67 %) для 900 К, что соответствует значениям 5–77 % соответственно [4]. Это указывает на то, что увеличение концентрации азота приводит к увеличению отрицательных (n-типа) парциальных зарядов ДУНТ.

### Список литературы

1. V. Zolyomi, et al., Intershell interaction in double walled carbon nanotubes: Charge transfer and orbital mixing, Phys. Rev. B, 77(24), 245403 (2008).
2. K.-Y. Chun., et al., Nitrogen doping effects on the structure behavior and the field emission performance of double-walled carbon nanotubes, Carbon, 47(1), 169–177 (2009).
3. P. Ayala., et al., Tailoring N-Doped Single and Double Wall Carbon Nanotubes from a Nondiluted Carbon/Nitrogen Feedstock, J. Phys. Chem. C, 111(7), 2879–2884 (2007).
4. S. A. Muminova et al., Nitrogen adsorption on double-walled carbon nanotube at different temperatures: mechanistic insights from molecular dynamics simulations. East European Journal of Physics No.1 (2024), 361-365

Ж.Х. МУРЛИЕВА<sup>1,2</sup>, Д.К. ПАЛЧАЕВ<sup>1</sup>, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия

<sup>2</sup>Дагестанский государственный университет народного хозяйства, Махачкала, Россия

## СВЯЗЬ ФОНОННОГО ТЕПЛОСОПРОТИВЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛОВ С КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

На большом экспериментальном материале показана линейная связь фононного теплосопротивления с произведением коэффициента теплового расширения на температуру в области низких и высоких температур, в том числе и для рыхлоупакованных структур, претерпевающих инверсию знака ангармонизма.

ZH. KH. MURLIEVA<sup>1,2</sup>, D.K. PALCHAYEV<sup>1</sup>, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State University, Makhachkala, Russia

<sup>2</sup>Dagestan State University of National Economy, Makhachkala, Russia

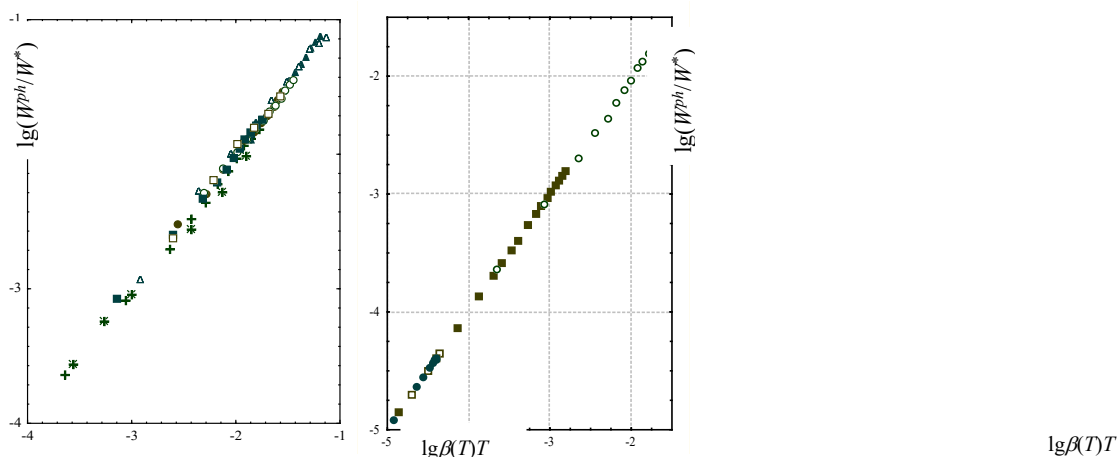
## RELATIONSHIP OF PHONON THERMAL RESISTANCE OF NON-METALS WITH THE THERMAL EXPANSION COEFFICIENT

Using a large amount of experimental material, a linear relationship was shown between phonon thermal resistance and the product of the coefficient of thermal expansion and temperature, in the region of low and high temperatures, including for loosely packed structures undergoing an inversion of the sign of anharmonicity.

Теория теплопроводности ( $\lambda$ ) конденсированных сред не позволяет количественно интерпретировать ее температурную зависимость, поскольку она построена в квазигармоническом приближении [1]. Хотя конечность теплопроводности и особенность ее температурной зависимости определяются ангармонизмом тепловых колебаний атомов решетки, однозначно связанным с коэффициентом теплового расширения (КТР), в неметаллах общее теплосопротивление  $W$  ( $W=1/\lambda$ ) – это аддитивная величина вкладов от рассеяния тепла на статических (границы, дефекты) и динамических дефектах – фононах.

Нами на большом экспериментальном материале литературных и собственных данных, установлено наличие линейной корреляции фононного теплосопротивления  $W^{ph}$  с произведением КТР ( $\beta$ ) на температуру в области низких и высоких температур. Она выполняется, в том числе, и для рыхлоупакованных структур, например, Si и InSb, претерпевающих инверсию знака КТР:

$$W^{ph} = W^* \beta T. \quad (1)$$



Корреляция  $W(T)/W^*$  и  $\beta(T)T$ : ● – KCl, ○ – NaCl, □ – SiO<sub>2</sub>  
▲ – SiC, ▲ – MnO, ■ – BeO, так и при + – Si, ※ – алмаз

Корреляция для Si и InSb при положительных (○, □) отрицательных (●, ■), значениях КТР.

Характеристическое теплосопротивление  $W^*$  в этом простом выражении (1), является постоянной величиной для каждого материала и может быть выражена через его микроскопические характеристические параметры [3].

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNN-2020-0002.

### Список литературы

1. Рейсленд Дж. Физика фононов. М.: Мир, 1975. 365с.
2. Murlieva Zh. Kh., Kazbekov K.K., Palchayev D.K., et. al. //Phys. of the Solid State Vol. 45. No 12, 2003, pp 2276-2280.
3. Палчаев Д.К., Мурлиева Ж.Х. Монография. – Махачкала: Издательство ДГУ, 2021, 248 с.



А.А. НИКИТИН<sup>1,2</sup>, С.В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, О.В. ОГОРОДНИКОВА<sup>2</sup>, А.А. БОГАЧЕВ<sup>1</sup>,  
П.А. ФЕДИН<sup>1</sup>, Т.В. КУЛЕВОЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЛАВА W-10Cr-0.5Y ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В работе проведены ускоренные испытания на радиационную стойкость перспективного материала для термоядерной энергетики, сплава W-10Cr-0.5Y. Образцы сплава облучались ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5.6 МэВ при 300 и 500°С до повреждающих доз 1 и 10 смещений на атом (сна). Методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии показано, что в результате облучения происходит распад твердого раствора с формированием наноразмерных кластеров, обогащенных хромом. Концентрация Cr в кластерах составляет  $52 \pm 2$  и  $77 \pm 3$  ат.% для доз облучения 1 и 10 сна соответственно.

A.A. NIKITIN<sup>1,2</sup>, S.V. ROGOZHNIKIN<sup>1,2</sup>, O.V. OGORODNIKOVA<sup>2</sup>, A.A. BOGACHEV<sup>1</sup>,  
P.A. FEDIN<sup>1</sup>, T.V. KULEVOY<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF W-10Cr-0.5Y ALLOY UNDER HEAVY ION IRRADIATION

In this work, hardness and micro- and nano-structure of W-10Cr-0.5Y alloy, which is a promising material for fusion reactors, before and after irradiation with Fe ions with an energy of 5.6 MeV at 300 and 500 °C were studied. Nanoindentation for hardness measurement and TEM and APT for structural changes were used. A formation of Cr clusters with the concentration of Cr in clusters of  $(52 \pm 2)$  and  $(77 \pm 3)$  at.% for radiation doses of 1 and 10 displacement per atom (dpa), respectively, was detected. An increase in the hardness with increasing the irradiation dose from 1 dpa to 10 dpa was found, which correlates with the increase in the Cr concentration in clusters.

Термоядерная энергетика является значительным научным и техническим вызовом в рамках перехода на возобновляемые, эффективные и экологически чистые источники энергии. Отработка технологии управляемого термоядерного синтеза для промышленных энергетических установок создает запрос на создание материалов активной зоны с повышенными эксплуатационными характеристиками. От них требуются высокая радиационная и механическая стойкость в условиях экстремальных радиационно-термических нагрузок, возникающих в условиях эксплуатации, в том числе при срывах плазмы и ее взаимодействии с элементами внутренней камеры реактора. В настоящее время вольфрам является одним из наиболее перспективных материалов для дивертора в конструкции реакторных установок типа ITER (международный экспериментальный термоядерный реактор) и DEMO (демонстрационной термоядерной энергетической установки), а в качестве подходящего материала стенки реактора, контактирующей с плазмой, рассматривается самопассивирующийся сплав W-10Cr-0.5Y. Ожидается, что сплав W-10Cr-0.5Y будет подвергаться воздействию нейтронных потоков высокой плотности, что может привести к изменению свойств этого материала. В данной работе приведены результаты моделирования радиационных нагрузок на этот материал путем облучения тяжелыми ионами, а также результаты анализа стабильности микро и наноструктуры и радиационного упрочнения этого сплава.

В работе проведены ускоренные испытания на радиационную стойкость перспективного материала для термоядерной энергетики, сплава W-10Cr-0.5Y. Образцы сплава облучались ионами Fe<sup>2+</sup> с энергией 5.6 МэВ при 300 и 500°С до повреждающих доз 1 и 10 смещений на атом (сна). Методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии показано, что в результате облучения происходит распад твердого раствора с формированием наноразмерных кластеров, обогащенных хромом. Концентрация Cr в кластерах составляет  $52 \pm 2$  и  $77 \pm 3$  ат.% для доз облучения 1 и 10 сна соответственно. Размер образовавшихся кластеров менее 2 нм, а объемная плотность  $\sim 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ .

## ПОЛУЧЕНИЕ НОВЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУЕ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА

В высокоскоростной струе плазмы дугового разряда получены многокомпонентные и композиционные материалы различного состава с керамической составляющей. Синтезированы дисперсные металломатричные композиционные материалы Al-WC и Cu-SiC с регулируемым количеством армирующего компонента. В системе Ti-Zr-Nb-Hf-Ta-C получены высокоэнтропийные однокомпонентные составы карбидов и карбонитридов в виде порошков и покрытий.

D.S. NIKITIN, A. NASSYRBAYEV, A.A. SIVKOV

National Researcher Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

## PRODUCTION OF NEW MULTICOMPONENT AND COMPOSITE MATERIALS IN A HIGH-SPEED ARC DISCHARGE PLASMA

Multicomponent and composite materials of various compositions with a ceramic component were obtained in a high-speed arc discharge plasma jet. Dispersed metal matrix composite materials Al-WC and Cu-SiC with a controlled amount of reinforcing component were synthesized. In the Ti-Zr-Nb-Hf-Ta-C system, high-entropy single-component compositions of carbides and carbonitrides were obtained in the form of powders and coatings.

Интерес к многокомпонентным керамическим, металлическим и композиционным материалам стремительно возрастает с каждым днем в связи с их уникальными структурой и свойствами, что позволяет использовать эти материалы в конструкционных и функциональных областях с жесткими условиями эксплуатации. Постоянно предпринимаются попытки соединения металлических и керамических материалов в единое композиционное изделие с целью армирования, особенно для таких химических систем, где совмещение металла и керамического компонента практически сложно достижимо (Cu-SiC, Al-WC и т.д.) [1]. Другая передовая область материаловедения – высокоэнтропийные материалы, которые исследуются сегодня, прежде всего, в части высокоэнтропийных сплавов. Постепенно эта область исследований расширяется и на высокоэнтропийные керамические материалы, в частности карбиды. Известны немногочисленные попытки получения высокоэнтропийных материалов на основе ультратугоплавких металлов (Hf, Zr, Ta)[2].

Одним из путей создания новых материалов, в том числе металломатричных композитов Al/W-C и Cu/Si-C, а также многокомпонентных и высокоэнтропийных материалов (Hf-Ta-Cи Ti-Zr-Nb-Hf-Ta-C), с возможностью реализации современных стратегий их разработки является синтез в высокоскоростной струе плазмы дугового разряда, генерируемой коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ), принципиальная схема которого представлена на рисунке 1. Основным подходом многокомпонентных материалов указанного состава является *in-situ*, когда синтез компонентов происходит при одновременном формировании дисперсного материала, который может являться шихтой для последующего изготовления готовых изделий (например, путем спекания), или покрытия.

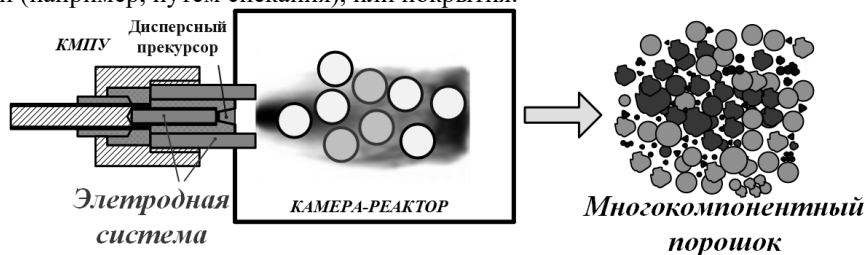


Рис. 1. Принципиальная схема методики получения многокомпонентного материала путем плазмодинамического синтеза

С использованием плазмодинамического синтеза получены дисперсные металломатричные материалы составом Al-WCи Cu-SiC с регулируемым количеством керамического компонента, которые скомпактированы методом искрового плазменного спекания до относительной плотности ~92 %. В системе Ti-Zr-Nb-Hf-Ta-C получены высокоэнтропийные однокомпонентные составы карбидов и, при добавлении азота в камеру-реактор, карбонитридов. Кроме того, указанные высокоэнтропийные соединения впервые получены в виде покрытий.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-73-01203), <https://rscf.ru/project/23-73-01203/>.

### Список литературы

1. Akrami S., Edalati P., Fuji M. and others // Journal of Alloys and Metallurgical Systems. 2024. Vol. 5. P. 100057.
2. Kareem S.A., Anaele J.U., Aikulola E.O. and others // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2021. Vol. 146. P. 100644.

И.В. НИКОЛАЕВ<sup>1</sup>, Н.Г. КОРОБЕЙЩИКОВ<sup>1</sup>, А.В. ЛАПЕГА<sup>1</sup>, Д.В. ТОПАКОВ<sup>2</sup>,  
Д.В. ЧЕСНОКОВ<sup>3</sup>, Н.А. УСУБАЛИЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>АО «ГЕРМАНИЙ», Красноярск, Россия

<sup>3</sup>ООО «СОЛЕННА», Новосибирск, Россия

## СГЛАЖИВАНИЕ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГЕРМАНИЯ ИОННО-КЛАСТЕРНЫМ ПУЧКОМ АРГОНА

Проведена обработка поверхности пластин монокристаллического германия кластерными ионами аргона при различных удельных энергиях кластеров. Продемонстрировано, что взаимодействие ионно-кластерного пучка аргона со шлифованной поверхностью германия приводит к снижению шероховатости поверхности приблизительно на 15%. Проведено сравнение воздействия кластерных ионов с удельной энергией кластеров 10 и 105 эВ/атом.

I.V. NIKOLAEV<sup>1</sup>, N.G. KORBEISHCHIKOV<sup>1</sup>, A.V. LAPEGA<sup>1</sup>, D.V. TOPAKOV<sup>2</sup>,  
D.V. CHESNOKOV<sup>3</sup>, N.A. USUBALIEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>JSC GERMANIUM, Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup>SOLENNА Ltd, Novosibirsk, Russia

## SMOOTHING OF THE GRINDED SURFACE OF SINGLE-CRYSTAL GERMANIUM BY AN ARGON CLUSTER ION BEAM

The treatment of surface wafer of single-crystal germanium is performed by argon cluster ions at different specific cluster energies. It is demonstrated that the interaction of argon cluster ion beam with a grinded germanium surface leads to a decrease in surface roughness by approximately 15%. A comparison is made of the impacts of cluster ions with specific cluster energies of 10 and 105 eV/atom.

Германий является высоко востребованным материалом в оптике и радиоэлектронике и широко используется при изготовлении тепловизоров, линз, оптоволокон, диодов, транзисторов и др. [1–3]. В настоящее время улучшение функциональных характеристик германия для современных приложений остается актуальной задачей.

Коллективное взаимодействие газовых кластеров с твердой поверхностью приводит к уникальным особенностям ионно-кластерной обработки, таким как латеральное распыление атомов, высокая локальная плотность энерговыделения и малоинвазивное воздействие (глубиной несколько нанометров). Это позволяет использовать ионно-кластерные пучки для различных видов модификации поверхности материалов, таких как полировка поверхности, формирование упорядоченных наноструктур и др. [4–6].

В данной работе проведена обработка поверхности пластин монокристаллического германия ионно-кластерным пучком аргона. На основе результатов, полученных нами ранее [7–9], для обработки поверхности мишени использовались кластерные ионы с различной энергией, приходящейся на один атом в кластере – 10 и 105 эВ/атом.

Исследованы особенности сглаживания шлифованной поверхности монокристаллического германия кластерными ионами аргона. С помощью атомно-силового микроскопа NTEGRA Prima HD получены изображения топографии поверхности мишеней до и после обработки в различных режимах. Показано, что обработка высокоэнергетическими (105 эВ/атом) кластерными ионами обеспечивает наибольшую эффективность сглаживания шлифованной поверхности германия (исходная среднеквадратичная шероховатость  $R_q \approx 50$  нм), что существенно отличается от результатов сглаживания поверхностей с меньшей шероховатостью ( $R_q \approx 20$  нм) и исходной субнанометровой шероховатостью ( $R_q \leq 1$  нм) [8,9]. Оценены усредненные значения параметров шероховатости. Продемонстрировано, что обработка ионно-кластерным пучком аргона приводит к сглаживанию неровностей с латеральными размерами от 120 нм до 1.4 мкм.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10061 (<https://rscf.ru/project/23-79-10061/>) с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ.

### Список литературы

1. G. Fisher, M.R. Seacrist, R.W. Standley // Proc. IEEE, 2012, Vol. 100, p. 1454.
2. E.E. Haller // Mater. Sci. Semic. Proc., 2006, Vol. 8, p. 408.
3. A. Toriumi, T. Nishimura // Jpn. J. Appl. Phys., 2018, Vol. 57, No. 1, Article No. 010101.
4. I. Yamada, J. Matsuo, N. Toyoda, A. Kirkpatrick // Mater. Sci. Eng. R, 2001, Vol. 34, p. 231.
5. V.N. Popok // Mater. Sci. Eng. R, 2011, Vol. 72, p. 137.
6. А.Е. Иешкин, А.Б. Толстогузов, Н.Г. Коробейщиков, В.О. Пеленович, В.С. Черныш // УФН, 2022, Том 192, №7, стр. 722.
7. N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, V.V. Atuchin, I.P. Prosvirin, A.V. Kapishnikov, A. Tolstogouzov, V. Pelenovich, D.J. Fu // Mater. Res. Bull., 2023, Vol. 158, Article No. 112082.
8. N.G. Korobeishchikov., I.V. Nikolaev, V.V. Atuchin et al. // Surf. Interfaces, 2021, Vol. 27, Article No. 101520.
9. I.V. Nikolaev, P.V. Geydt, N.G. Korobeishchikov et al. // Nanomaterials, 2022, Vol. 12, p. 670.

## СТРУКТУРА И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ( $x = 1,8$ И $2$ ) С ПЕРСПЕКТИВОЙ ДЛЯ БИМЕДИЦИНСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

Цитратным методом из нитратов получены порошки  $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 1,8$  и  $2$ ). Исследована структура, элементный и фазовый состав методами рентгеновской дифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии, исследованы гистерезисные магнитные свойства на вибромагнитометре.

P.I. NIKOLENKO, I.V. SHCHETININ, T.R. NIZAMOV, Y.O. KULANCHIKOV  
National University of Science and Technologies MISIS, Moscow, Russia

## STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$ ( $x = 1,8$ AND $2$ ) WITH PROSPECTS FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS

Powders  $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 1,8$  and  $2$ ) were obtained from nitrates using the citrate method. The structure, elemental and phase composition were studied using x-ray diffractometry and scanning electron microscopy, and the hysteretic magnetic properties were studied using a vibromagnetometer.

В последние годы большое внимание учёных привлекают исследования биомедицинских применений гексаферритов. Существуют исследования, свидетельствующие, что данные соединения не оказывают токсического эффекта на большинство органов [1-2]. Как магнитные материалы, гексаферриты могли бы быть перспективными материалами для магнитной гипертермии опухолей. Однако в методе магнитной гипертермии заложена идея нагрева магнитных частиц в высокочастотных низкоамплитудных магнитных полях. А гексаферриты обладают высокой коэрцитивной силой: согласно работе [3] коэрцитивная сила гексаферрита стронция достигала 533 кА/м. При таких значениях коэрцитивной силы этот материал не способен перемагничиваться и нагреваться в полях, используемых в методе магнитной гипертермии. Поэтому целью работы является снизить коэрцитивную силу гексаферрита стронция путём легирования, избегая сильного спада намагниченности.

В работе цитратным методом из нитратов были получены соединения  $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$  ( $x = 1,8$  и  $2$ ). Для получения чистой фазы гексаферрита проводился отжиг при 1200 °С в течение часа. Для полученных образцов был проведён фазовый анализ методом рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре Rigaku Ultima IV, сняты фотографии топологии поверхности частиц и картирование элементного состава на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOLJSM-6490, сняты петли магнитного гистерезиса на вибромагнитометре VSM-250 в поле 1500 кА/м.

Фазовый анализ показал, что оба образца содержат 100 % фазы гексаферрита стронция. Размеры частиц порошка, согласно фотографиям, полученным на СЭМ, варьировались в диапазоне от 1 до 10 мкм. Картирование элементного состава показало равномерное распределение элементов по объёму в обоих образцах.

Из петель магнитного гистерезиса были получены данные о коэрцитивной силе и максимальной намагниченности образцов. Для образцов  $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$  со степенями легирования  $x = 1,8$  и  $2$  коэрцитивная сила составила 12,4 и 11,8 кА/м соответственно. По сравнению с нелегированным гексаферритом коэрцитивная сила критически снижена. Таких низких значений коэрцитивной силы будет достаточно для перемагничивания в низкоамплитудных полях, применяемых в методе магнитной гипертермии. Также для образцов  $\text{SrFe}_{12-x}\text{In}_x\text{O}_{19}$  со степенями легирования  $x = 1,8$  и  $2$  максимальная намагниченность составила 42,3 и 37,9 А·м<sup>2</sup>/кг соответственно. Намагниченность сохраняется на достаточно высоком уровне, что позволяет надеяться на выраженный нагрев таких образцов при внесении в низкоамплитудные высокочастотные переменные магнитные поля.

Таким образом, полученные материалы могут быть перспективными для применения в магнитной гипертермии. На данный момент необходимо проведение дальнейших исследований магнитной гипертермии образцов, измельчение образцов до размеров наночастиц и получение их коллоидных растворов. А также исследование цитотоксичности.

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям, предоставленного в рамках программы «Студенческий стартап» федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства».

### Список литературы

1. Вершинина С.Ф., Евтушенко В.И. Эффект внутриопухолевого имплантирования гексаферрита бария, магнетита, гематита, окиси алюминия и кремнезема на динамику роста опухоли Эрлиха и выживаемость мышей-опухоленосителей // Медицинский академический журнал. 2020. Т. 20. № 1. С. 75–82.
2. Structural, magnetic, and biocompatibility evaluations of chromium substituted barium hexaferrite ( $\text{Co}_2\text{-Y}$ ) for hyperthermia application / Mukesh Suthar, Deepak Khare, Ansit Gangwar // Materials Chemistry and Physics. – 2023. – V. 296.
3. Тимофеев А.В. Получение поликристаллических гексагональных ферритов типа М с мультиферроидными свойствами и повышенными значениями степени магнитной текстуры: Дисс. канд. техн. наук. – М., НИТУ МИСиС, 2018. – 136 с.

## РАЗМЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ МЕДИ И АЛЮМИНИЯ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОГО СИНТЕЗА В ВОДЕ

Методами атомно-силовой микроскопии исследованы размерные характеристики наночастиц меди и алюминия, полученных в плазме электрического взрыва проводников в воде. Показано, что максимумы размерных распределений с ростом числа проводников, взорванных в одном и том же объеме воды, смещаются в сторону наночастиц больших размеров. При этом наблюдается рост как «среднеарифметического», так и «среднеобъемного» размера наночастиц меди и алюминия.

S.A. NURETDINOV, V.V. TARKOVSKY, A.V. ZELIANKO  
Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

## DIMENSIONAL CHARACTERISTICS OF COPPER AND ALUMINUM NANOPARTICLESELECTROEXPLOSIVE SYNTHESIS IN WATER

The dimensional characteristics of copper and aluminum nanoparticles obtained in the plasma of an electric explosion of conductors in water were studied using atomic force microscopy methods. It has been shown that the maxima of the size distributions shift towards larger nanoparticle sizes as the number of conductors exploded in the same volume of water increases. At the same time, there is an increase in both the “arithmetic mean” and the “volume average” size of copper and aluminum nanoparticles.

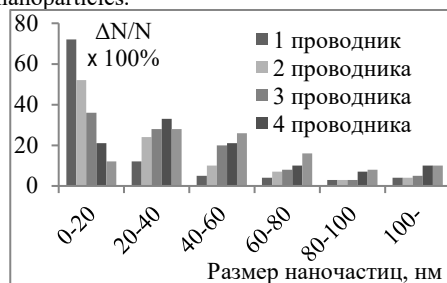


Рис. 1

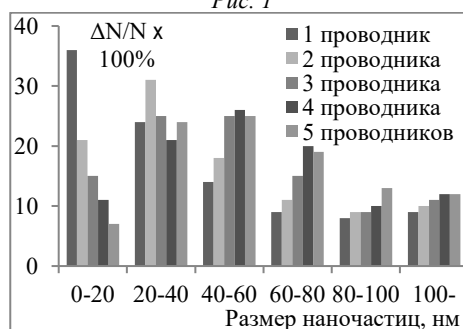


Рис. 2

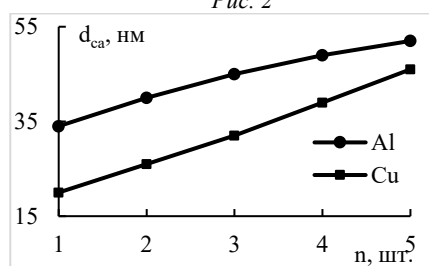


Рис. 3

В настоящее время для совершенствования свойств материалов они подвергаются модификации путем введения различных веществ, в том числе и наночастиц [1]. Перспективным методом синтеза наночастиц является их синтез в плазме электрического взрыва проводников [2]. К концам тонкого проводника, находящегося в жидкости или плотном газе, прикладывается высокое импульсное напряжение. Проводник нагревается, плавится, испаряется, а пар частично ионизируется, т.е. он превращается в плазму – происходит электрический взрыв проводника. Синтез наночастиц происходит на стадии рекомбинации плазмы [3].

Установка для электрического взрыва проводников создана на основе систем возбуждения электроразрядных лазеров и ламп [4-5]. Ее выходные параметры рассчитывались по методике, аналогичной [6]. Электрическому взрыву подвергались проводники из меди диаметром 0,4 мм и алюминия диаметром 0,8 мм длиной по 80 мм в 500 см<sup>3</sup> дистиллированной воды. Размерные характеристики полученных наночастиц исследовались на атомно-силовом микроскопе NT-206.

На рис. 1 представлены гистограммы распределения размерных характеристик наночастиц меди, а на рис. 2 алюминия, синтезированных в плазме электрического взрыва, в зависимости от числа диспергированных проводников. Видно, что с ростом числа проводников, взорванных в одном и том же объеме воды, максимум размерных распределений наночастиц смещается в сторону больших их размеров.

На рис.3 представлены зависимости «среднеарифметического» размера наночастиц  $d_{ср}$  меди и алюминия от числа взорванных в одном и том же объеме воды проводников, полученных путем статистической обработки гистограмм приведенных на рис. 1 и 2. Наблюдается практически линейный рост размера синтезированных наночастиц с ростом числа диспергированных проводников. Подобное наблюдается и для «среднеобъемного» размера синтезированных наночастиц.

Рост среднего размера наночастиц с ростом числа взорванных в одном и том же объеме воды числа проводников обусловлен электростатическим взаимодействием между составляющими наносuspensions.

### Список литературы

1. Витязь П.А., Свиуднович Н.А., Куис Д.В. // Наноматериаловедение, Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 511 с.
2. Ануфрик С.С., Курьн Н.Н., Зноско К.Ф., Жукова И.И. // Журнал БГУ. Физика. 2017. № 2. С. 83-94
3. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Тарковский В.В. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.6, Тэхніка.2018. Т.8, № 1. С. 50-61.
4. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курганский А.Д. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16, № 11. С. 2228–2231.
5. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 2. С. 81–91.
6. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264-1271.

## МОДИФИКАЦИЯ РЕЗИСТИВНОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ПОЛИЕН-ПОЛИИНОВЫХ ЦЕПОЧЕК НАНОЧАСТИЦАМИ TiO<sub>2</sub>

В работе представлены результаты исследования пленок, полученные методом дегидрогалогенирования поливинилиденфторида наночастицами TiO<sub>2</sub>. Методами инфракрасной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния показано, что с увеличением концентрации наночастиц происходит изменение структуры пленки на основе полиен-полииновых цепочек. Рассмотрены изменения свойств газового сенсора от концентрации наночастиц TiO<sub>2</sub>.

I.F.NURIAKHMETOV

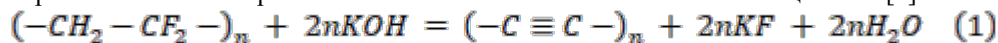
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## MODIFICATION OF A RESISTIVE GAS SENSOR BASED ON POLYENE-POLYIENE CHAINS WITH TiO<sub>2</sub> NANOPARTICLES

The paper presents the results of a study of films obtained by dehydrohalogenation of polyvinylidene fluoride with TiO<sub>2</sub> nanoparticles. Fourier-transform infrared spectroscopy and Raman spectroscopy have shown that with an increase in the concentration of nanoparticles, the structure of the film based on polyene-polyiine chains changes. Changes in the properties of a gas sensor from the concentration of TiO<sub>2</sub> nanoparticles are considered.

В настоящее время ведется активная работа по изучению материалов на основе углерода, обладающих большими возможностями для модификации [1]. Синтезированные материалы часто не обладают необходимыми свойствами, требующиеся для выполнения определенной задачи. Ранее были выполнены работы по исследованию газового сенсора на основе дегидрогалогенированного поливинилиденфторида (ПВДФ) [2]. Вследствие этого актуальной задачей является изучение настраиваемости свойств газовых сенсоров на основе полиен-полииновых структур. Одним из решений данной задачи является создание композитов с использованием наночастиц.

В проведенной работе образцы изготавливались в несколько этапов. На первом этапе получали пленки путем растворения прекурсора ПВДФ в N,N-диметилформамиде с ацетоном с добавлением в раствор наночастиц TiO<sub>2</sub> и последующим испарением в чашках Петри. На следующем этапе полученные пленки подвергались химической реакции дегидрофторирования в растворе ацетона и метанола в соотношении 9:1 и перенасыщенного раствора KOH. Реакция проходит в соответствии с формулой (1). В результате химической реакции формировались тонкие пористые пленки на основе полиен-полииновых цепочек [2].



Сенсорные свойства образцов с нанесенными контактами измерялись внутри перчаточного бокса. Газы вводились внутрь камеры при помощи самодельного дозатора, в котором предварительно испарялось требуемое вещество (гидроксид аммиака, этанол, ацетон).

Результаты исследования колебательных спектров четырех образцов показывают значительное изменение в структуре пленки в области 1700-2700 см<sup>-1</sup> при добавлении наночастиц TiO<sub>2</sub>, которые могли привести к перестроению полиен-полииновых цепочек в образце (рис.1a). Исследование свойств газовых сенсоров показало, что происходит существенное увеличение чувствительности на пары веществ и уменьшение селективности газового сенсора на пары гидроксида аммиака (рис.1b)

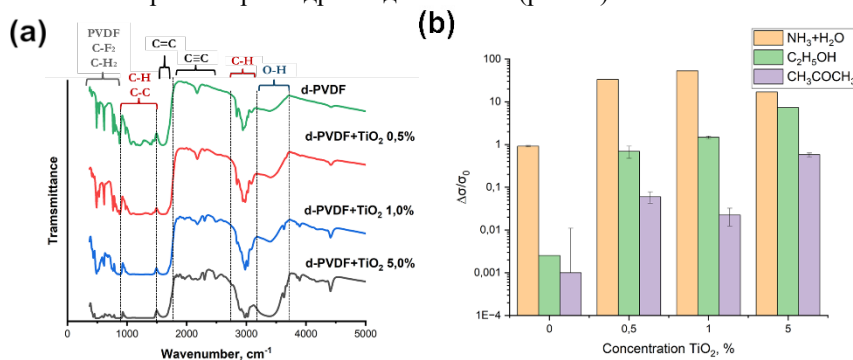


Рис. 1.ИК спектр (а) и относительное изменение проводимости при различной концентрацииTiO<sub>2</sub>(б).

### Список литературы

- Li J., Yin D., Qin Y. Carbon materials: structures, properties, synthesis and applications // Manufacturing Rev. 2023, V.10, P.13.
- Zavidovskiy I.A., Streletskiy O.A., Nuriakhmetov I.F., Nishchak O.Y., Savchenko N.F., Tatarintsev A.A., Pavlikov A.V. Highly Selective Polyene-Polyiine Resistive Gas Sensors: Response Tuning by Low-Energy Ion Irradiation // Journal of Composites Science. 2023, V.7, P.156.

## **НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МУФТ НА ОСНОВЕ СТОПОК ВТСП ЛЕНТ**

Исследованы нагрузочные характеристики электромагнитных муфт различных типов: на основе постоянных магнитов и на основе стопок из высокотемпературных сверхпроводниковых лент, в радиальной и аксиальной конфигурациях. Разработана и верифицирована модель для численного расчёта характеристик электромагнитных муфт методом конечных элементов. На основе полученной модели проведена оптимизация параметров сверхпроводящей муфты и показано, что муфты на основе ВТСП композитов могут иметь характеристики, схожие с традиционными устройствами на основе постоянных магнитов, но превосходят их демпфирующей способности.

M.A. OSIPOV, I.V. MARTIROSYAN, A.S. STARIKOVSKII, S.V. POKROVSKII  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **LOAD CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC CLUTCH BASED ON STACKS OF HTS-TAPES**

Distortions of the displacements measured by the heterodyne interferometer due to penetration of the electric excitation signal of the acousto-optic modulator into the path of registration and processing of optical signals are considered. The level of this type of noise is estimated and the ways of its elimination from data obtained using a three-coordinate heterodyne interferometer are proposed.

Одним из важных элементов кинетического накопителя энергии является магнитная муфта. Она позволяет осуществлять механическую связь между маховиком, вращающимся в вакуумном объеме, и двигателем/генератором. Наиболее распространены магнитные муфты, которые позволяют осуществлять связь между маховиком и двигателем/генератором за счет магнитного взаимодействия. Муфты на постоянных магнитах [90, 91] позволяют достигать высоких сил сцепления, но требуют механического разведения частей муфты для размыкания в режиме сохранения энергии, нестабильны и не обладают демпфирующими свойствами. Альтернативой могут быть муфты на основе сверхпроводников. Поскольку концепция кинетического ВТСП накопителя энергии заведомо предполагает наличие криогенной системы охлаждения, интеграция сверхпроводящей магнитной муфты в состав устройства не требует существенных конструктивных изменений. Важным преимуществом сверхпроводящих муфт является то, что они обладают свойством самостабилизации и хорошими демпфирующими свойствами, а размыкание и замыкание муфты может осуществляться путем нагрева и охлаждения сверхпроводника.

В данной работе проведено исследование нагрузочных характеристик различных типов электромагнитных муфт. Исследованы муфты радиальной и аксиальной конфигурации. Для обоих типов конфигурации проведено сравнение традиционных муфт на постоянных магнитах и муфт на основе стопок ВТСП лент, рассмотрены аналогичные конфигурации. Измерена зависимость момента сил от угла поворота муфты. Сверхпроводящие муфты были изготовлены с использованием стопок из 50 фрагментов ВТСП лент 12x12 мм, с критическим током 500 А, охлаждение производилось при помощи жидкого азота до температуры 78К. Для исследованных конфигураций, жесткость сцепления муфт на постоянных магнитах превосходила ВТСП муфты почти на порядок.

Для анализа полученных результатов разработана модель для численного расчёта характеристик электромагнитных муфт. Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов в среде инженерного моделирования Comsol Multiphysics. Моделирование выполнено методом конечных элементов с использованием смешанной А-Т-Н формулировки. Расчетные данные с хорошей точностью согласуются с экспериментальными, что подтверждает легитимность использования модели для расчёта характеристик сверхпроводящих муфт. Разработанная модель была использована для оптимизации сверхпроводящей муфты и расчета её характеристик. Муфта была модернизирована путем добавления ВТСП обмоток, снижения рабочей температуры и использования более сильных постоянных магнитов. Результаты моделирования нагрузочных характеристик оптимизированной ВТСП муфты свидетельствуют о том, что магнитный привод на основе ВТСП композитов может иметь характеристики, схожие с традиционными устройствами на основе постоянных магнитов. Также результаты расчетов показывают, что ВТСП муфты значительно превосходят муфты на постоянных магнитах по демпфирующей способности.

В рамках данной работы получены новые данные о свойствах электромагнитных муфт на основе сверхпроводящих композитов, которые могут быть использованы для практической реализации в кинетических накопителях энергии.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### *Список литературы*

1. Waring R., Hall J., Pullen K., Etemad M. R. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 1996. Vol. 210, № 4. P. 263-272.
2. Cong M., Liu K. // Recent patents on engineering. 2010. Vol. 4, № 1. P. 7-14.

Д.К. ПАЛЧАЕВ, Ж.Х. МУРЛИЕВА, М.Х. РАБАДАНОВ, М.Э ИСХАКОВ,  
С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ, Р.М. ЭМИРОВ, А.Э. РАБАДАНОВА  
*Дагестанский государственный университет ДГУ, Махачкала, Россия*

## СВЯЗЬ ФОНОННОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ С ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ КЛАССИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

Показана определяющая роль эффекта ангармонизма колебаний атомов в формировании фононного электросопротивления проводников, на основе его связи с теплоемкостью и коэффициентом теплового расширения, отнесенным к текущей температуре.

D.K. PALCHAYEV, Zh.Kh. MURLIEVA, M.Kh. RABADANOV, M. E. ISKHA KOV,  
S.Kh. GADZHIMAGOMEDOV, R.M. EMIROV, A.E. RABADANOVA  
*Dagestan State University DSU, Makhachkala, Russia*

## RELATIONSHIP OF PHONON ELECTRICAL RESISTANCE WITH THERMODYNAMIC PARAMETERS OF CLASSICAL METALS

The determining role of the effect of anharmonicity of atomic vibrations in the formation of the phonon electrical resistance of conductors is shown, based on its connection with the heat capacity and the coefficient of thermal expansion divided by temperature.

Сложность энергетических спектров электронов и фононов не позволяет количественно описать температурную зависимость электросопротивления даже для классических металлов [1,2]. Причиной этого является отсутствие знаний об истинной природе формирования деформационного потенциала [3], который определяет эффективное сечение рассеяния электрона. Теория допускает приближение гармонических колебаний, ввиду сложности учета нелинейности сил взаимодействия и незначительности изменения объема. Рассеяние электронов на фононах определяется изменением сечения рассеяния, обусловленного хаотизацией амплитуды гармонических колебаний атомов, задаваемой только температурой. Хотя известно [4], что гармонический вибратор оказывает сильное сопротивление хаотизации колебаний, поскольку на действие приложенной силы откликается только центр инерции системы. Таким образом, ангармонизм имеет [3] непосредственное отношение к формированию термического деформационного потенциала. Он приводит к расширению (или сжатию) решетки до достижения объемом значения, при котором полная свободная энергия минимальна [3]. В своих работах мы показали наличие линейной связи между температурными зависимостями фононных электро- и теплосопровитлений с термодинамическим комплексом, представляющим произведение коэффициент теплового расширения на температуру.

В след за этим, для металлов установлено, что экспериментальные значения атермического сопротивления, коэффициента теплового расширения и теплоемкости, отнесенные к температуре, описываются единой кривой. Она представляет собой геометрическое место точек выхода энтропии на экстремаль для каждого равновесного состояния и демонстрирует связь изменений термических возбуждений электронной и атомной подсистем. Согласно этой зависимости, при нулевой температуре обобществленные электроны принимают значения ниже энергии Ферми. Их кинетическая энергия является энергией хаотизации, имеющей квантовый характер, т.е. нетермическая энтропия  $S_e$  электронной подсистемы максимальна. При этом кинетическая энергия термической хаотизации атомов оказывается минимальной, т.е. им характерен минимум энтропии  $S_a$ . Устойчивость рассматриваемого ансамбля при  $T \approx 0K$  обеспечивается максимумом энтропии  $S_e$  электронной подсистемы при минимуме свободной энергии атомной подсистемы. При внешнем физическом воздействии, первыми откликаются электроны, с энергиями близкими к энергии Ферми. Это приводит к росту термического возбуждения электронной подсистемы и формированию тонкого слоя заполненных и свободных энергетических состояний – размытию границы Ферми, максимум на величину  $0,03\varepsilon_F$ . Размытие уровня Ферми сопровождается возбуждением атомов, связь между которыми обеспечивается квантованным полем тех же зарядовых возбуждений. Таким образом, снижение квантовой хаотизации электронной подсистемы компенсируется термическим возбуждением атомной подсистемы того же порядка ( $0,03\varepsilon_F \approx k_B T_D$ ), что согласно теореме Вириала, соизмеримо с уменьшением потенциальной энергии взаимодействия, связанной с возбуждением электронной и атомной подсистем.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002.

### Список литературы

1. Блатт Ф. Дж. Теория подвижности электронов в твердых телах. - М.: ГИФМЛ, – 1963. – 223 с.
2. Пайерлс Р. Сюрпризы в теоретической физике. – М.: Наука 1988, 176 с.
3. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. – М.: Мир, 1974. – 472.
4. Пиппард А. Физика колебаний. Квантово-механические системы: Пер. с англ. Д. А. Соболева / Под ред. А. Н. Матвеева. – М.: Выс. шк., 1989. – 263 с.



С.В. ПОКРОВСКИЙ, И.А. РУДНЕВ, И.В. МАРТИРОСЯН, А.Н. МАКСИМОВА, Д.А. АБИН,  
А.Н. МОРОЗ, М.А. ОСИПОВ, С.В. ВЕСЕЛОВА, А.С. СТАРИКОВСКИЙ, К.А. БОРОДАКО,  
Д.А. АЛЕКСАНДРОВ, А.Ю. МАЛЯВИНА, И.К. МИХАЙЛОВА, А.А. МИХАЙЛОВ,  
В.В. ЗАЛЕТКИНА, О.В. ЧЕРНЫШЕВА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ТРАНСПОРТНЫЕ, МАГНИТНЫЕ И ЛЕВИТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Представлены основные результаты, полученные молодежной лабораторией «Сверхпроводящие энергетические системы». Проведены разработки теоретических подходов и мультифизического моделирования элементов сверхпроводниковых энергетических устройств: генератор, индуктивный и кинетический накопители энергии. Выполнены экспериментальные исследования элементов устройств. Проанализированы переходные динамические процессы перехода ВТСП ленты в нормальное состояние для реализации переключающих устройств и защиты от квенча.

S.V. POKROVSKII, I.A. RUDNEV, I.V. MARTIROSIAN, A.N. MAKSIMOVA, D.A. ABIN, A.N.  
MOROZ, M.A. OSIPOV, S.V. VESELOVA, A.S. STARIKOVSKII, K.A. BORODAKO, D.A.  
ALEKSANDROV, A.Y. MALYAVINA, I.K. MIKHAILOVA, A.A. MIKHAILOV, V.V. ZALETKINA,  
O.V. CHERNYSHOVA

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **TRANSPORT, MAGNETIC AND LEVITATION CHARACTERISTICS OF ENERGY DEVICES SUPERCONDUCTING ELEMENTS**

The main results obtained by the youth laboratory «Superconducting Energy Systems» are presented. The development of theoretical approaches and multiphysics modeling of superconducting energy devices elements has been carried out: generator, inductive and kinetic energy storage devices. Experimental studies of device elements have been carried out. The transient dynamic processes of the transition of the HTS tape to the normal state are analyzed for the implementation of switching devices and protection against quench.

Развитие как традиционной, так и «зеленой» энергетики требует разработки и внедрения новых подходов для генерации, хранения и передачи электроэнергии. Ключевыми параметрами современных энергетических устройств и установок являются эффективность и безопасность. Кроме того, для применений важны и массо-габаритные параметры устройств. Один из вариантов по улучшению этих параметров является использование сверхпроводниковых технологий для реализации энергетических устройств.

В данном докладе представлен обзор основных результатов исследований, выполненных молодежной лабораторией «Сверхпроводящие энергетические системы» НИЯУ МИФИ. Исследования и разработки лаборатории на данный момент сосредоточены на трех типах устройств: генератор, индуктивный и кинетический накопители энергии. Несмотря на ограничения, разрабатываемые подходы и решения являются также применимыми для целого ряда устройств. Выполнены два типа исследований: теоретические расчеты сверхпроводящих композитов и мультифизическое моделирование элементов энергетических устройств, экспериментальное исследование элементов устройств. Разработаны методики численного анализа динамики нестационарных магнитных, токовых процессов в слоистых ВТСП композитах в Н, А, А- $J$  и А- $T$ - $H$  формулировках нестационарных уравнений Максвелла для выполнения комплексного расчета широкого спектра ВТСП устройств. Определены области применимости подходов. Были проанализированы элементы генератора в виде незамкнутых обмоток (рейстрек) и замкнутых кольцевых элементов, которые также могут выступать в виде магнитов захваченного магнитного потока. В качестве элементов кинетического накопителя энергии рассмотрены сверхпроводящие магнитные муфты (радиальная и аксиальная) и сверхпроводящий бесконтактный подшипник. Показана возможность достижения не только малых потерь за счет отсутствия трения, но также высокие демпфирующие характеристики сверхпроводящих муфт и подшипника. Также рассмотрены кабели, CORC кабель и твистированная стопка ВТСП лент, которые могут быть использованы для создания обмоток индуктивного накопителя энергии. Для всех типов обмоток выполнены исследования потерь при различных условиях работы устройства в широком интервале температур. Проведены экспериментальные исследования магнитных и транспортных характеристик элементов, потерь на переменном токе. Результаты были использованы для верификации модельных подходов. Также выполнено экспериментальное исследование магнито-левитационных характеристик сверхпроводниковых муфт и подшипника кинетического накопителя энергии. Получено хорошее согласие экспериментальных данных и расчетных результатов. Важной частью всех рассматриваемых энергетических устройств также является коммутационная система. Были проведены исследования переключений в композитных ВТСП лентах при воздействии импульсов тока мс длительностей. Полученные данные о параметрах динамического перехода сверхпроводящей ленты в нормальное состояние позволяет предсказать безопасные режимы работы устройств, а также разработать и реализовать систему защиты при квенче.

Работа выполнена в рамках Госзадания (проект FSWU-2022-0013) при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

В.В. ПОПОВ<sup>1</sup>, А.П. МЕНУШЕНКОВ<sup>1</sup>, Ф.Э. ДУБЯГО<sup>1</sup>, А.А. ЯСТРЕБЦЕВ<sup>1</sup>, Б.Р. ГАЙНАНОВ<sup>1</sup>,  
А.А. ИВАНОВ<sup>1</sup>, С.Г. РУДАКОВ<sup>1</sup>, М.М. БЕРДНИКОВА<sup>1</sup>, А.А. ПИСАРЕВ<sup>1</sup>, Е.Б. МАРКОВА<sup>2</sup>,  
Е.С. КУЛИКОВА<sup>3</sup>, Н.А. КОЛЫШКИН<sup>3</sup>, Е.В. ХРАМОВ<sup>3</sup>, Я.В. ЗУБАВИЧУС<sup>4</sup>, И.В. ЩЕТИНИН<sup>5</sup>,  
С.М. НОВИКОВ<sup>6</sup>, М.К. ТАТМЫШЕВСКИЙ<sup>6</sup>, Н.В. ОГНЕВСКАЯ<sup>7</sup>, Н.А. ЦАРЕНКО<sup>7</sup>,  
М.П. ГОЛОВАЩЕНКО<sup>7</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>РУДН, Москва, Россия

<sup>3</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>4</sup>ЦКП «СКИФ», Институт катализа СО РАН им. Г.К. Борескова, Кольцово, Россия

<sup>5</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

<sup>6</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>7</sup>АО ВНИПИПромтехнологии, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ВИДА РЗЭ НА КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ, ЛОКАЛЬНУЮ СТРУКТУРУ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХРОМИТОВ $LnCrO_3$

Исследованы структурные и каталитические свойства индивидуальных и высокоэнтропийных хромитов РЗЭ  $LnCrO_3$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ). Показано, что параметры кристаллической, локальной структуры, а также каталитические свойства синтезированных образцов во многом определяются видом РЗЭ.

V.V. POPOV<sup>1</sup>, A.P. MENUSHENKOV<sup>1</sup>, F.E. DUBYAGO<sup>1</sup>, A.A. YASTREBTSEV<sup>1</sup>, B.R. GAYNANOV<sup>1</sup>,  
A.A. IVANOV<sup>1</sup>, R.G. RUDAKOV<sup>1</sup>, M.M. BERDNIKOVA<sup>1</sup>, A.A. PISAREV<sup>1</sup>, E.B. MARKOVA<sup>2</sup>,  
E.S. KULIKOVA<sup>3</sup>, N.A. KOLYSHKIN<sup>3</sup>, E.V. KHRAMOV<sup>3</sup>, Y.V. ZUBAVICHUS<sup>4</sup>, I.V. SHCHETININ<sup>5</sup>,  
S.M. NOVI-KOV<sup>6</sup>, M.K. TATMYSHEVSKIY<sup>6</sup>, N.V. OGNEVSKAYA<sup>7</sup>, N.A. TSARENKO<sup>7</sup>,  
M.P. GOLOVASHCENKO<sup>7</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
RUDN, Moscow, Russia

<sup>3</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>4</sup>Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Koltsovo, Russia

<sup>5</sup>National University of Science and Technology MISiS, Moscow, Russia

<sup>6</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

<sup>7</sup>JSC Design and Survey and Research & Development Institute of Industrial Technology, Moscow, Russia

## INFLUENCE OF Ln TYPE ON THE CRYSTAL, LOCAL STRUCTURE AND CATALYTIC PROPERTIES OF $LnCrO_3$ CHROMITES

The structural and catalytic properties of individual and high-entropy rare earth chromites  $LnCrO_3$  ( $Ln = La, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ) have been studied. It has been shown that the parameters of the crystalline and local structure, as well as the catalytic properties of the synthesized samples, are largely determined by the type of rare earth elements.

Хромиты редкоземельных элементов (РЗЭ) являются частью большого семейства перовскитов  $ABO_3$  (где А - РЗЭ, а В – переходный  $d$ -элемент), которые обладают уникальным физическо-химическими свойствами и являются перспективными для применения в качестве датчиков, катализаторов, проводников ионов кислорода, соединительных материалов для твердооксидных топливных элементов, материалов для магнитного охлаждения, мультиферроиков и т.д.

Цель данной работы – изучение влияния вида РЗЭ на параметры кристаллической, локальной структуры и каталитические свойства индивидуальных и высокоэнтропийных хромитов РЗЭ  $LnCrO_3$  с использованием уникальной комбинации локально-чувствительных методов рентгеновской дифракции (s-XRD) и рентгеновской спектроскопии поглощения (XANES и EXAFS); колебательной спектроскопии (ИК- и КР-спектроскопии), сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), синхронного термического анализа (ДСК + ТГ), а также комплекса адсорбционных и каталитических методик.

Обнаружено, что независимо от типа РЗЭ порошки как индивидуальных, так и высокоэнтропийных хромитов  $LnCrO_3$  имеют орторомбическую структуру (пр. гр.  $Pbnm(62)$ ), степень искажения которой увеличивается с уменьшением катионного радиуса РЗЭ. Анализ локальной структуры показал наличие во всех синтезированных хромитах степени окисления (+3) как катионов РЗЭ, так и катионов хрома. Установлено, что локальное окружение катионов  $Ln^{3+}$  и  $Cr^{3+}$  в высокоэнтропийных образцах близко к окружению аналогичных ионов в индивидуальных соединениях. Следует отметить, что локальное окружение катионов  $La^{3+}$  существенно отличается от окружения других катионов  $Ln^{3+}$  ( $Ln = Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb, Y$ ). Показано, что конверсия пропана с использованием в качестве катализаторов крекинга хромитов РЗЭ увеличивается с ростом кислотности поверхности, которая возрастает с уменьшением катионного радиуса РЗЭ внутри гомологического ряда  $LnCrO_3$  при переходе от La к Yb. Отличительной особенностью катализаторов на основе высокоэнтропийных хромитов (по сравнению с индивидуальными хромитами) является образование бутадиена, доля которого резко увеличивается с ростом температуры крекинга.

Работа была частично поддержана Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2021-1352) и Государственного контракта (№ FSWU-2023-0070).

А.Э. РАБАДАНОВА, Д.К. ПАЛЧАЕВ, С.Х. ГАДЖИМАГОМЕДОВ,  
Ж.Х. МУРЛИЕВА, Р.М. ЭМИРОВ, Ш. П. ФАРАДЖЕВ  
Дагестанский государственный университет ДГУ, Махачкала, Россия

## СВЯЗЬ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ YBCO

Представлены результаты исследований электросопротивления и теплового расширения микрокристаллического YBCO, содержащего несколько сверхпроводящих фаз. Показано наличие корреляции аномалий на температурных зависимостях электросопротивления и теплового объемного расширения для каждой из фаз.

A.E. RABADANOVA, D.K. PALCHAEV, S.KH. GADZHIMAGOMEDOV,  
ZH.KH. MURLIEVA, R.M. EMIROV, SH.P. FARADZHEV  
Dagestan State University DGU, Makhachkala, Russia

## RELATIONSHIP OF ELECTRICAL RESISTANCE AND THERMAL EXPANSION OF YBCO

The results of studies of electrical resistance and thermal expansion of microcrystalline YBCO containing several superconducting phases are presented. The presence of correlation of anomalies on temperature dependencies of electrical resistance and thermal volume expansion for each phase is shown.

Проблема установления природы высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) является одним из важных вопросов физики конденсированного состояния. Основным отличием ВТСП материалов от низкотемпературных сверхпроводников является сравнительно высокая рыхлость упаковки, обусловленная значительным вкладом ковалентной связи. Сверхпроводящие свойства YBCO задаются уровнем допирования, определяемым содержанием лабильного кислорода. Изменение его содержания приводит к деформации параметров решетки и фазовому переходу от тетрагональной несверхпроводящей фазы к орторомбической сверхпроводящей фазе. В связи с чем, очевидна актуальность рассмотрения роли термической деформации решетки при переходе в сверхпроводящее состояние, т.е. не только при изменении степени допирования, но и особенностей изменения параметров решетки в зависимости от температуры.

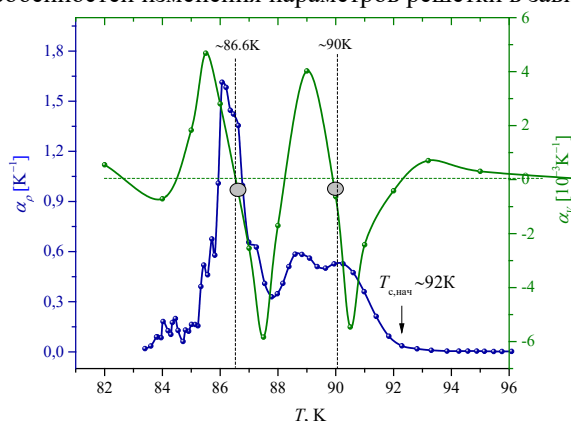


Рис. 1. Температурные зависимости коэффициентов электросопротивления и теплового расширения в области сверхпроводящего перехода для микрокристаллического образца YBCO

Нами исследованы электросопротивление и тепловое расширение микрокристаллического образца YBCO, полученного методом твердофазного спекания. После спекания при 910°C содержание основной фазы составляло ~92% со стехиометрией по кислороду  $x=0.9$ . По рентгеноструктурным исследованиям в интервале от 300K до 82K были определены параметры ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и объем решетки  $V$ . Положительная стрикция объема  $V$  происходит примерно от 92K до 90K и от 88 до 87 K, на эти те же области температурной зависимости электросопротивления приходятся срединные значения  $T_c = 90.5K$  и  $T_c = 87K$  для двух сверхпроводящих фаз. На рисунке 1 приведены температурные зависимости коэффициентов электросопротивления ( $\alpha_\rho$ ) и теплового расширения ( $\alpha_v$ ) в области сверхпроводящего перехода.

Как видно, на всем интервале сверхпроводящего перехода, аномалии температурных коэффициентов электросопротивления и объемного расширения в  $T_c$ , для каждой из сверхпроводящих фаз, представляются отклонениями от оси, где их значения равны нулю. Размах отклонений коэффициента объемного расширения в этих образцах, с изменением знака термической деформации, находится в пределах амплитуды аномалии, наблюдаемой, обычно, для керамики YBCO с одной оптимально допированной сверхпроводящей фазой.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNNZ-2020-0002 и РФФИ № 20-32-90170.

С. В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, А. В. КЛАУЗ<sup>1,2</sup>, А. А. ХОМИЧ<sup>1,2</sup>, А. А. БОГАЧЕВ<sup>1,2</sup>, А. А. НИКИТИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ НА АНАЛИЗ НАНОСТРУКТУРЫ ДУО СТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МАЛОУГЛОВОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОВ

Методом малоуглового рассеяния нейтронов исследована наноструктура ферритно-мартенситных дисперсно-упрочненных оксидами сталей с различными системами легирования (различное содержание Cr, V, W, Al и Zr). Проведено сопоставление результатов исследования наноструктуры сталей (оксидных частиц и кластеров) в ферромагнитном состоянии с учетом и без учета магнитного рассеяния. Показано, что оксидные частицы имеют существенно больший магнитный контраст в сравнении с наноразмерными кластерами. В то же время наиболее точные значения твердости удается получить, учитывая как оксидные включения, так и кластеры.

S. V. ROGOZHNIKIN<sup>1,2</sup>, A. V. KLAUZ<sup>1,2</sup>, A. A. KHOMICH<sup>1,2</sup>, A. A. BOGACHEV<sup>1,2</sup>, A. A. NIKITIN<sup>1,2</sup>,

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

## STUDY OF THE EFFECT OF MAGNETIC SCATTERING ON THE ANALYSIS OF THE NANOSTRUCTURE OF ODS STEELS BY SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING

The nanostructure of ferritic-martensitic oxide dispersion-strengthened steels with different alloying systems (different content of Cr, V, W, Al and Zr) is investigated by small-angle neutron scattering. A comparison of the results of the study of the nanostructure of steels (oxide particles and clusters) in the ferromagnetic state with and without magnetic scattering is carried out. It is shown that oxide particles have a significantly higher magnetic contrast in comparison with nanoscale clusters. At the same time, the most accurate hardness values can be obtained by taking into consideration of both oxide inclusions and clusters.

Отличительной особенностью дисперсно-упрочненных оксидами (ДУО) сплавов и сталей, обеспечивающей существенное повышение жаропрочности в сравнении с традиционными материалами, является значительное число равномерно распределенных наноразмерных оксидов. Для детальной характеристики таких материалов применяют комплекс методик, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), атомно-зондовая томография (АЗТ), малоугловое рентгеновское рассеяние (МУРР) и малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН). Если ПЭМ и АЗТ с высокой точностью могут охарактеризовать типы имеющихся включений (оксидов и кластеров), то МУРР и МУРН позволяют наиболее достоверно определить средние характеристики включений в макроскопических объемах материала (размеры и объемную плотность). При этом МУРН позволяет получать наиболее представительные данные с образцов толщиной ~1 мм, в то время как МУРР – с образцов толщиной ~100 мкм. Достоинством МУРН является также использование не только ядерного, но и магнитного контраста для анализа наноструктуры материалов. Это особенно важно для анализа наноструктуры ферритно-мартенситных сталей, являющихся ферромагнитными материалами. Для такого рода исследований МУРН анализ ДУО сталей проводится в насыщающем магнитном поле, но учет вклада магнитного рассеяния необходим и в экспериментах без внешнего магнитного поля, поскольку образцы могут находиться в ферромагнитном состоянии. Целью настоящей работы является выявление роли магнитного рассеяния при анализе наноструктуры ДУО ферритно-мартенситных сталей.

В работе проведен анализ наноструктуры трех ДУО сталей Eurofer ODS, 13.5Cr-Fe3Y ODS и KP-4 gen1 ODS с различными системами легирования методом малоуглового рассеяния нейтронов с учетом магнитного рассеяния в ферромагнитном состоянии этих сталей [1, 2]. Исследуемые стали содержат значительное число оксидных включений и кластеров, детектируемых методами ПЭМ и АЗТ.

Методом МУРН определены средние размеры и плотности оксидных включений. Средние размеры крупных частиц варьировались в диапазоне 50–70 нм, а их объемная плотность в диапазоне  $(0.3–0.8) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Средние размеры мелких частиц варьировались в диапазоне 4–6 нм, а их объемная плотность в диапазоне  $(3–21) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$ .

Средний размер детектированных методом МУРН нановключений находится между значениями средних размеров включений, детектируемых методами ПЭМ и АЗТ во всех сталях, что указывает на необходимость рассматривать модели, комбинирующие различные типы включений, при анализе МУРН данных. Показано, что учет магнитного рассеяния дает значения объемной плотности включений, определяемые из МУРН данных, в большей степени согласующиеся с результатами ПЭМ и АЗТ, и повышает точность расчетов упрочнения сталей за счет включений в сравнении с измеренными величинами твердости.

### Список литературы

1. S.V. Rogozhkin, A.V. Klauz, Yu. Ke, L. and others // *Nanomaterials* 2024, 14, 194. DOI: 10.3390/nano14020194.
2. S. V. Rogozhkin, A. V. Klauz, Yu. E. Gorshkova, and others // *Phys. Met. Metallogr.* 2024, Vol. 125, No. 1, pp. 93–99. DOI: 10.1134/S0031918X23602718.

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЕНОК MoS<sub>x</sub> НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА НА ФОТОКАТОДЕ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ MoS<sub>x</sub>/WSe<sub>2</sub>

Проведены исследования химического состояния каталитических слоев MoS<sub>x</sub>, полученных методом импульсного лазерного осаждения при варьировании лазерного флюенса и давления буферного газа. Установлена структура электронных энергетических зон на интерфейсе с WSe<sub>2</sub>. Оптимизированы режимы осаждения пленок, в результате которых получены нанослои MoS<sub>x</sub> с минимальным содержанием состояний, ответственных за смещение уровня Ферми ко дну запрещенной зоны. С помощью метода DFT определены участки поверхности пленок с повышенной каталитической активностью в реакции выделения водорода.

O.V. RUBINKOVSKAYA, D.V. FOMINSKIY, R.I. ROMANOV, V.YU. FOMINSKIY  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EFFECT OF THE CHEMICAL STATE OF MoS<sub>x</sub> CATALYTIC FILMS ON THE EFFICIENCY OF HYDROGEN EVOLUTION ON THE PHOTOCATHODE WITH THE MoS<sub>x</sub>/WSe<sub>2</sub> HETEROPHASE

Research on the chemical state of MoS<sub>x</sub> catalytic layers, obtained through the pulsed laser deposition method with variations in laser fluence and buffer gas pressure, has been conducted. The structure of the electronic energy bands at the interface with WSe<sub>2</sub> has been established. Deposition film conditions have been optimized, resulting in MoS<sub>x</sub> nanolayers with minimal states responsible for shifting the Fermi level towards the bottom of the forbidden zone. Utilizing the Density Functional Theory (DFT) method, surface areas of the films with enhanced catalytic activity in the hydrogen evolution reaction have been determined.

Халькогениды переходных металлов (ХПМ), такие как Mo/W//S<sub>x</sub>/Se<sub>x</sub>, проявляют многообещающие каталитические свойства в реакции выделения водорода под действием солнечного света, что обусловлено эффективной генерацией носителей заряда в полупроводниковых фотокатадах. Остается актуальными задачи простого и контролируемого синтеза таких материалов, а также изучения их электронных свойств, что приводит к повышенной (фото) электрокаталитической активности со стабильными характеристиками.

В работе рассмотрены особенности применения пленок MoS<sub>x</sub>, формируемых методом импульсного лазерного осаждения [1], для создания эффективного фотокатада на основе перспективного фотоактивного наноматериала WSe<sub>2</sub>. Первый образец MoS<sub>x</sub> был изготовлен при низком флюенсе ( $\leq 2$  Дж/см<sup>2</sup>) при давлении аргона 15 Па. Второй образец был изготовлен при высоком флюенсе ( $\geq 10$  Дж/см<sup>2</sup>) при давлении 10<sup>-3</sup> Па. Это обусловило изменение электронной структуры и локальной упаковки слоев MoS<sub>x</sub> (рис. 1). Слои WSe<sub>2</sub> предварительно создавались на стеклоглереде методом термохимического синтеза.

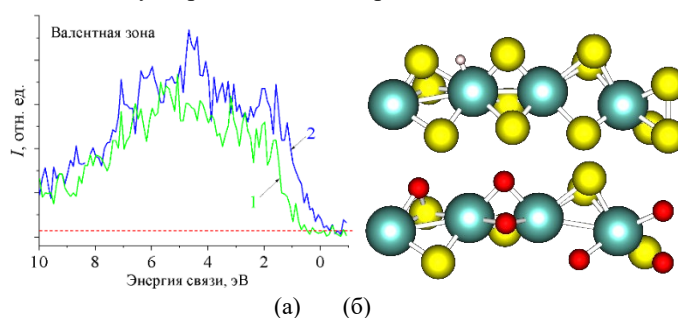


Рис. 1. (а) Фотоэлектронные спектры валентных зон образцов, синтезированных при низком (кривая 1) и высоком (кривая 2) флюенсе и разных вакуумных условиях; (б) модельная структура MoS<sub>3</sub>/MoS<sub>3</sub>(O) с замещением серы на кислород (характерна для пленок, осажденных в аргоне).

В результате оптимизации режимов осаждения были получены каталитические слои с минимальным содержанием субстехиометрических состояний, ответственных за смещение уровня Ферми ко дну запрещенной зоны. Взаимное расположение электронных энергетических зон для WSe<sub>2</sub> и MoS<sub>x</sub>(O) оказалось более предпочтительным для эффективного разделения фото-генерированных носителей заряда на интерфейсе MoS<sub>x</sub>(O)/WSe<sub>2</sub>, что привело к повышению эффективности генерации водорода. Фотокатод обладал стабильными характеристиками в электролите. Плотность фототока при нулевом потенциале достигла  $\sim 3$  мА/см<sup>2</sup> против 0,1 мА/см<sup>2</sup> для пленок субстехиометрического состава. Согласно результатам моделирования, методом DFT наилучшая каталитическая активность реализуется при формировании аморфного сульфоксида (сочетание Mo<sup>4+</sup> и Mo<sup>5+</sup>), при этом процесс катализа происходит на кластерах MoS<sub>2-x</sub>.

### Список литературы

1. Romanov R., Fominski V., Demin M., Fominski D., Rubinkovskaya O. and others // *Nanomaterials* 2021. Vol. 11, P. 1461.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР, СОСТОЯЩИХ ИЗ ЛЕГИРОВАННОГО И НЕЛЕГИРОВАННОГО СЛОЕВ, В ОБЛАСТИ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ЧАСТОТ

Представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств полупроводниковых структур, состоящих из легированного и нелегированного слоев, в области терагерцовых частот. В диапазоне  $2 \div 10$  ТГц ( $67 \div 333$  см<sup>-1</sup>) измерены ИК спектры пропускания и отражения структур, состоящих из непроводящей подложки GaAs(100) и эпитаксиально выращенной на ней тонкой пленки n<sup>+</sup>-GaAs. Условия роста обеспечивали следующие параметры образцов: плазменная частота была выше частоты внешнего электромагнитного поля, толщина пленки была порядка скин-слоя.

S.A. SAVINOV, YU.A. MITYAGIN, I.P. KAZAKOV

P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## OPTICAL PROPERTIES OF SEMICONDUCTOR STRUCTURES CONSISTING OF DOPED AND UNDOPED LAYERS IN THE TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

The results of experimental studies of the optical properties of semiconductor structures consisting of doped and undoped layers in the terahertz frequency range are presented. In the range of  $2 \div 10$  THz ( $67 \div 333$  cm<sup>-1</sup>), the IR transmission and reflection spectra of structures consisting of a non-conducting GaAs(100) substrate and an n<sup>+</sup>-GaAs thin film epitaxially grown on it were measured. The growth conditions provided the following parameters of the samples: the plasma frequency was higher than the frequency of the external electromagnetic field, the film thickness was on the order of the skin layer.

Было зарегистрировано уменьшение пропускания исследуемых образцов по сравнению с подложкой GaAs. Для образца с концентрацией примеси  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> расхождение с подложкой наблюдалось для частот до 4-5 ТГц. Для образца с концентрацией примеси  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> кривая пропускания проходила еще ниже, а расхождение с подложкой доходило практически до области полосы остаточных лучей в GaAs.

Особенностью спектров отражения, помимо резонансного изменения коэффициента отражения в области полосы остаточных лучей и наличия минимума при частоте, немного большей частоты продольного оптического фонона, являлось относительное увеличение коэффициента отражения при освещении образцов со стороны проводящей пленки. Эффект сильнее выражен для структур с большей концентрацией примеси, что можно объяснить уменьшением толщины скин-слоя и ее приближением к толщине пленки  $0.2$  мкм из-за падения удельного сопротивления легированного слоя ( $\delta \sim \sqrt{\rho}$ , для частоты  $5$  ТГц при  $n_e = 10^{19}$  см<sup>-3</sup>  $\delta \approx 0.5$  мкм).

При освещении образцов со стороны подложки отражение зависело от соотношения частоты внешнего поля и частоты столкновений электронов с кристаллической решеткой пленки  $\nu_c$ . При частотах, меньших  $\nu_c$ , спектр отражения образцов проходил ниже относительно спектра подложки GaAs, что, видимо, связано с дополнительным поглощением на свободных носителях в проводящем слое. Расхождение хорошо проявляется в случае структуры с концентрацией примеси  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>, для которой подвижность электронов в пленке, согласно литературным данным, падает до  $1000\text{--}1200$  см<sup>2</sup>/В•с, а соответствующая частота столкновений составляет  $\sim 4$  ТГц.

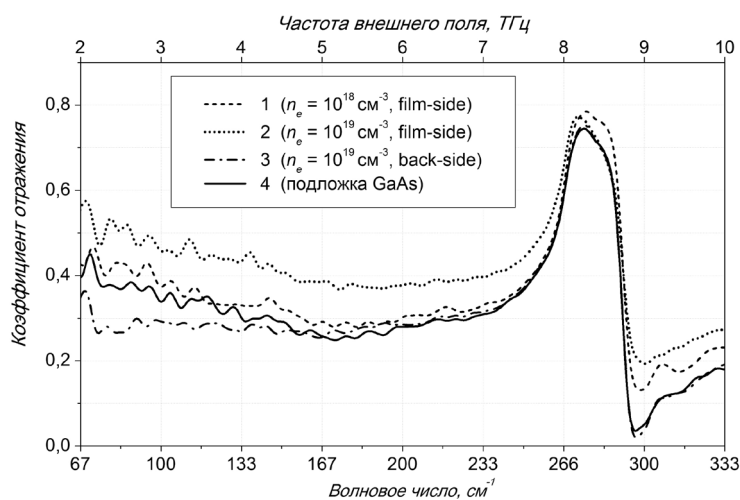


Рис. 1. ИК спектры отражения исследуемых структур: 1 –  $n_e=10^{18}$  см<sup>-3</sup>, со стороны пленки; 2 –  $n_e=10^{19}$  см<sup>-3</sup>, со стороны пленки; 3 –  $n_e=10^{19}$  см<sup>-3</sup>, со стороны подложки. Для сравнения также приведен спектр отражения подложки GaAs (кривая 4).

Ф. САФАРОВ<sup>1,2</sup>, Х. СОАТОВА<sup>2</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Денауский институт предпринимательства и педагогики, Денау, Узбекистан

<sup>3</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## ПОНИМАНИЕ ЗАРОДЫШЕОБРАЗОВАНИЯ ДВУСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Для достижения целевого синтеза двухстенных углеродных нанотрубок крайне важно понимание этапа нуклеации. В данном исследовании мы используем метод молекулярной динамики для выявления различных стадий нуклеации двухстенных углеродных нанотрубок.

F. SAFAROV<sup>1,2</sup>, H. SOATOVA<sup>2</sup> U. KHALILOV<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Denau Institute of Entrepreneurship and Pedagogy, Denau, Uzbekistan

<sup>3</sup>University of Antwerp, Belgium

## UNDERSTANDING THE NUCLEATION OF DOUBLE-WALL CARBON NANOTUBES

To achieve targeted synthesis of double-walled carbon nanotubes, it is critical to understand the intricacies of the nucleation step. In this study, we use molecular dynamics to elucidate the different stages of nucleation of double-walled carbon nanotubes.

В отличие от одностенных углеродных нанотрубок (ОСНТ), двухстенные углеродные нанотрубки (ДСНТ) обладают превосходной механической прочностью и термической стабильностью. Однако широкое внедрение ДСНТ сталкивается с трудностями из-за проблем с их селективным выращиванием [1]. Понимание процесса нуклеации (зародышеобразования) имеет ключевое значение для точного контроля роста углеродных нанотрубок [2]. В данном исследовании изучается процесс нуклеации ДСНТ с использованием молекулярной динамики. Рост осуществляется путем облучения метановых видов [3] на Ni<sub>91</sub>нанокластер. В ходе симуляций температура системы поддерживалась на уровне 2000 К, регулируемая каноническим термостатом Бусси. Одновременно кластер физсорбировался на виртуальной поверхности Al. Основываясь на предварительных результатах, процесс можно разделить на два этапа: 1) Этапы, приводящие к достижению катализатором точки сверхнасыщения и последующему формированию графеновых сетей на нем, тесно повторяют процесс нуклеации ОСНТ [4] (Рис. 1а и 1б); 2) По мере расширения и подъема начальной структуры в форме крышки с поверхности нанокластера, атомы углерода рассеиваются внутри нанокластера, образуя свежие цепочки углерода на его поверхности. Эти цепочки в конечном итоге способствуют созданию начальных углеродных кольцевых структур, что приводит к окончательному формированию второй крышки (Рис. 1с и 1д).

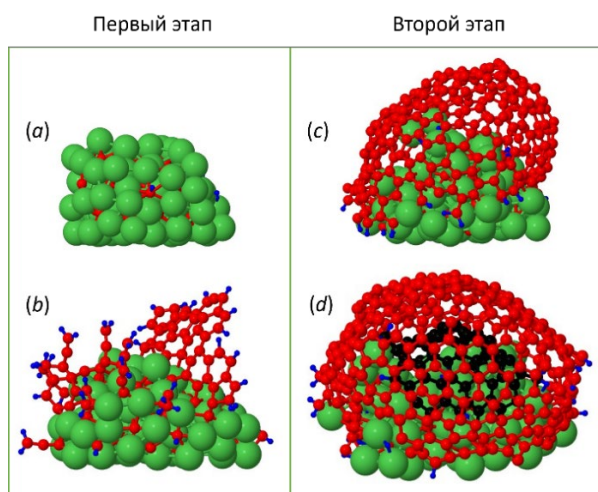


Рис. 1. Нуклеации двухстенных углеродных нанотрубок: (а) точка сверх-насыщения; (б) формирование графеновой сети; (с) образование первой крышки; (д) образование второй крышки. Атомы Ni, С и Н показаны зеленым, красным (черным) и синим цветом соответственно

### Список литературы

1. Shen C. et al., *Nanoscale* 3, 503-518 (2011).
2. Khalilov U. et al., *Nature Communications* 6, 10306 (2015).
3. Hash D. B. et al., *Journal of Applied Physics* 93, 750-752 (2003).
4. Khalilov U. et al., *Nanoscale* 6, 9206-9214 (2014).

## ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОВКЛАДА В ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ РАЗРЯД НА СОСТАВ, СТРУКТУРУ И МОРФОЛОГИЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦ

Представлены результаты исследования профилей размерных распределений синтезированных наноструктур NiCr сплава и биметалла Cu-Ag в зависимости от величины энергии, вложенной в электровзрывной разряд. Показано, что с ростом вложенной энергии профили размерных распределений смещаются в сторону наноструктур больших размеров.

I.H. SERHIYENKA, A.A. KAZMIN,

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus*

## INFLUENCE OF ENERGY DEPOSIT IN ELECTRIC EXPLOSIVE DISCHARGE ON THE COMPOSITION, STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF SYNTHESIZED NANOPARTICLES

The results of a study of the size distribution profiles of synthesized nanostructures of NiCr alloy and Cu-Ag bimetal depending on the amount of energy deposited in the electric explosive discharge are presented. It is shown that with increasing input energy, the profiles of size distributions shift towards larger nanostructures.

В настоящее время наноструктуры нашли широкое применение в науке, технике, производстве [1]. Перспективными методами их синтеза являются лазерная абляция [2-3] и электровзрывной разряд [4-5] в жидких средах. Под действием импульсного тока большой величины тонкий проводник, расположенный в жидкости, нагревается, плавится, испаряется и ионизируется. В жидкости, на месте проводника, зажигается электровзрывной разряд. Образование наноструктур происходит во время рекомбинации плазмы. Окружающая разрядный канал жидкость аккумулировала синтезированные наноструктуры. Экспериментальная установка создана на концептуальной основе систем возбуждения электроразрядных лазеров и ламп [6-7]. Ее электрофизические параметры предварительно рассчитывались по методике подобной [8] с учетом результатов [9]. Диспергировался Ni-Cr сплав диаметром 0,6 мм и биметалл Cu-Ag. Биметалл - медный проводник диаметром 0,4 мм в оболочке из серебра толщиной 0,05 мм.

Полученные гистограммы распределения размерных характеристик наноструктур как Ni-Cr сплава, так и биметалла Cu-Ag показывают, что они зависят от вкладываемой в электровзрывной разряд энергии. Увеличение вкладываемой в электровзрывной разряд энергии приводит к росту размеров синтезированных наноструктур и смещению максимумов размерных распределений в сторону наноструктур больших размеров. Как «среднеобъемный», так и «среднеарифметический» диаметры наночастиц NiCr и Cu-Ag с ростом вкладываемой энергии в диапазоне 400-2400 Дж сначала уменьшаются, а затем возрастают. Это обусловлено тем, что диспергирование проводников происходит в результате двух основных процессов. На первом этапе происходит расширение паров металлов и разлет микрокапель обусловленный термическим нагревом. На втором этапе происходит электрический пробой продуктов термического нагрева с формированием на месте проводника столба разрядной плазмы.

В электровзрывном диспергировании металлических проводников участвуют оба процесса. Доминирующий процесс определяется отношением энергии введенной в проводник к энергии сублимации материала проводника. Так, при малых значениях энергии (~400 Дж) доминирует первый процесс. Синтезированные наноструктуры имеют большие размеры. При энергиях ~800 Дж соотношение роли обоих процессов становится оптимальным, а размеры наноструктур минимальные. С ростом вложенной в проводник энергии размер наноструктур должен уменьшаться. Самостоятельный разряд в продуктах термического нагрева должен приводить к дополнительному диспергированию микрокапель, их испарению и ионизации, образованию очень мелких наноструктур, росту их концентрации. Это подтверждается резким снижением светопропускания полученных наносuspensions с ростом вложенной энергии. Однако исследования размерных характеристик наноструктур методами атомно-силовой микроскопии показывают обратное. С ростом введенной в разряд энергии (>1200 Дж) наблюдается рост размеров наноструктур.

### *Список литературы*

1. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673–718.
2. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 7. С. 99–106.
3. Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Сергиенко И.Г., Серенко М.Ю. // Фундамент. проблемы радиоэлектронного приборостр. 2014. Т. 14, № 2. С. 84–87.
4. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д. С. // Журнал технической физики. 2015. Т. 85, № 5. С. 81–87
5. Сергиенко И.Г., Зноско К.Ф., Лещик С.Д., // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.б, Тэхніка. 2017. Т.7, № 2. С. 47–57.
6. Ануфрик С.С., Володенков А.П., Зноско К.Ф. // Журнал прикладной спектроскопии. 1999. Т. 66, №5. С. 702–707.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. б. Тэхніка. 2019. Т.9, № 2. С. 81–91.
8. Anufrik S.S., Volodenkov A.P., Losev V. F., Znosko K.F. // Russian Physics Journal. 2012. V. 54, № 11. P. 1264–1271.
9. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат. фіз. інфарм., выліч. тэхн. ікрп.. 2018. Т. 8, № 3. С. 83–92.



Н.Н. СИТНИКОВ, С.В. ГРЕШНЯКОВА, И.А. ЗАЛЕТОВА

*АО ГНЦ «Центр Келдыша», Москва, Россия*

## **МИКРОСТРУКТУРА СЛОИСТЫХ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВА $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

Рассмотрено влияние микросекундной электроимпульсной обработки на микроструктуру быстрозакалённых слоистых аморфно-кристаллических лент из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , обладающих эффектом обратимой памяти формы. Определены стадии электроимпульсной обработки и взаимосвязь формируемой структуры с реализацией эффектов памяти формы и сопутствующих им мартенситным превращениям.

N.N. SITNIKOV, S.V. GRESHNYAKOVA, I.A. ZALETOVA

*SSC «Keldysh Research Center», Moscow, Russia*

## **MICROSTRUCTURE OF LAYERED AMORPHOUS CRYSTALLINE $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ ALLOY RIBBONS AFTER VARIOUS STAGES OF ELECTRIC PULSE TREATMENT**

The effect of microsecond electric pulse processing on the microstructure of rapid-quenched layered amorphous-crystalline ribbons  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  alloy with the effect of two-way shape memory is considered. The stages of electric pulse processing and the relationship of the formed structure with the realization of shape memory effects and accompanying martensitic transformations are determined.

В качестве объекта исследования были выбраны слоистые аморфно-кристаллические ленты, полученные методом спиннингования расплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  на быстровращающемся медном диске. В результате закалки расплава, происходящего со скоростью охлаждения расплава около  $5 \cdot 10^5$  K/c, получены тонкие ленты толщиной около 39 мкм и шириной около 1,5 мм в аморфно-кристаллическом состоянии. При равномерном отводе тепла и соблюдении оптимальных технологических параметров спиннингования на неконтактной поверхности ленты образуется тонкий слой кристаллической фазы и формируется аморфно-кристаллическая лента с резкой границей, разделяющей аморфное и кристаллическое состояния на слои, т.е. лента представляет собой слоистый структурный композит. В таких быстрозакалённых слоистых аморфно-кристаллических лентах из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  без какой-либо дополнительной термомеханической обработки реализуется эффект обратимой памяти формы (ЭОПФ) [1, 2]. Такие слоистые структурные композиты с ЭОПФ имеют перспективы для использования в микромеханике, один из ярких примеров это микрозахваты для различных назначений [2, 3].

Полученные быстрозакалённые слоистые аморфно-кристаллические ленты могут быть дополнительно подвергнуты различным обработкам, с целью получения новых свойств и модификации уже имеющихся эффектов памяти формы. В частности, перспективна электроимпульсная обработка (ЭИО), которая заключается в пропускании через образец единичного или серии коротких импульсов электрического тока и позволяет разогревать образцы за короткие времена и проводить кристаллизацию без изотермической выдержки. Такая динамическая кристаллизация приводит к образованию новых структурных состояний быстрозакалённых сплавов. В частности, после такой обработки в слоистых аморфно-кристаллических лентах можно изменить соотношение аморфных и кристаллических фаз или сформировать структуру с различными слоями: кристаллические слои по краям ленты, а в средней части сохранить аморфное состояние; кристаллические слои с различными характеристиками.

В работе проведены ЭИО полученных аморфно-кристаллических лент из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  единичным импульсом длительностью 1 мс с различными степенями обработки от стадии не без изменения структуры (внешний вид без изменений) до стадии полностью кристаллизованного состояния (окисел на поверхности и потеря упругости и ЭОПФ). Из полученных лент были изготовлены металлографические шлифы, для получения поперечных сечений полученных образцов. Дополнительно поверхности поперечных сечений лент были подтравлены для проявления микроструктуры образцов. Полученные микроструктуры были исследованы на растровом электронном микроскопе. Были проведены исследования характеристик мартенситных превращений методом дифференциальной сканирующей калориметрии, полученные результаты сопоставлены с реализацией эффектов памяти формы.

В результате исследований получена последовательная серия микроструктур образцов лент из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  с различными стадиями ЭИО и соответствующих им кривых калориметрии, на которых наблюдается развитие образования кристаллической фазы из аморфной части с увеличением энергии вкладываемой в обрабатываемый образец при ЭИО. В зависимости от степени ЭИО прослеживается изменение характеристик ЭОПФ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00035, <https://rscf.ru/project/24-22-00035/>.

### *Список литературы*

1. Sitnikov N.N., Sivtsova G.V., Shelyakov A.V. and others // J. of Physics: Conf. Series. 2020. Vol. 1686. P. 012057.
2. Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Borodako K.A. and others // J. of Micro-Bio Robotics. 2020. Vol. 16. P. 43–51.
3. Фон Гратовски С.В., Жуковская М.И., Луничкин А.М. и др. // ЖТФ. 2023. Том 93. Вып. 8. С. 1223-1230.

Е.Р. СЛЕПЦОВА, П.С. ДЖУМАЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КАРБИДА КРЕМНИЯ С ПОКРЫТИЯМИ В ГИДРОТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрена стойкость SiC к гидротермической коррозии с покрытиями на основе Cr, нанесенных методом магнетронного осаждения. Исследованы адгезионная прочность покрытий с SiC подложкой, коррозионное поведение в автоклавных испытаниях, приближенных к эксплуатационным условиям легководных реакторов, а также при высокотемпературном окислении.

E.R. SLEPTSOVA, P.S. DZHUMAIEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## CORROSION RESISTANCE OF SILICON CARBIDE WITH COATINGS UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS

The resistance of SiC to hydrothermal corrosion with Cr-based coatings applied by magnetron deposition is considered. The adhesive strength of coatings with SiC substrate, corrosion behavior in autoclave tests close to the operating conditions of light-water reactors, as well as under high-temperature oxidation, have been studied.

Материалы на основе карбида кремния являются одними из наиболее перспективных для создания оболочек ТВЭЛов толерантного ядерного топлива, поскольку он обладает большой устойчивостью к высокотемпературному окислению и более высокими температурой плавления и радиационной стойкостью по сравнению с циркониевыми сплавами. Однако SiC склонен к растворению при эксплуатационных условиях легководных реакторов [1]. Решением данной проблемы может стать нанесение защитных покрытий на внешний слой оболочек.

В работе исследуется коррозионная стойкость карбида кремния в гидротермических условиях и при высокотемпературном окислении с покрытиями на основе хрома, нанесенных методом магнетронного осаждения. По результатам скретч-теста выявлено, что хромовое покрытие толщиной 5 мкм начинает разрушаться при нагрузке 20 Н, что свидетельствует о его неудовлетворительном сцеплении с SiC подложкой.

Рассматриваются два способа повышения адгезии хромового покрытия с карбидом кремния. Первый состоит в нанесении промежуточного подслоя из алюминия толщиной 1 мкм и последующем отжиге при температуре 750 °С для образования диффузионного слоя взаимодействия на границах раздела SiC-Al и Al-Cr за счет кристаллизации новой фазы (рис. 1а). Однако в результате термообработки в покрытии возникают трещины, которые значительно влияют на его механические свойства – начало разрушения при скретч-тесте начинается при 7 Н. При высокотемпературном окислении образцов на воздухе при 1100 °С в течение 1000 с образуется пассивная оксидная пленка из Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Но в ходе автоклавных испытаний в воде при температуре 350 °С, давлении 16 МПа в течение 50 ч покрытие отслаивается и, следовательно, не является защитным.

Альтернативный способ повышения адгезии между Cr и SiC заключается в термообработке образцов с непосредственно хромовым покрытием на карбидокремниевой подложке. В результате диффузионного отжига при температуре 950 °С на границе раздела покрытия с подложкой образуется слой взаимодействия между Cr и SiC (рис. 1б), что значительно повышает адгезионную прочность – покрытие не разрушается вплоть до максимальной нагрузки при скретч-тестировании равной 80Н. В ходе испытаний при высокотемпературном окислении на поверхности образца также образуется пленка из Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Покрытие выдерживает и автоклавные испытания: удельный привес массы образца составляет 0,012 мг/см<sup>2</sup>, в то время как образец без покрытия испытывает убыль массы равную 0,007 мг/см<sup>2</sup>, что согласуется с литературными данными [2]. Таким образом, данное покрытие в гидротермических условиях, а также при высокотемпературном окислении может быть рассмотрено как защитное применительно к оболочкам ТВЭЛов на основе карбида кремния.

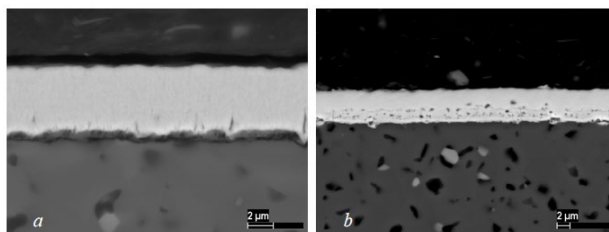


Рис. 1. РЭМ-изображения поперечных сечений образцов с а — Cr-Al покрытием после отжига; б — CrI покрытием после отжига

### Список литературы

1. Zinkle S.J., et al. Accident tolerant fuels for LWRs: a perspective // J. Nucl. Mater. 2014. V. 448. P. 374-379.
2. Quillin K., et al. Experimental evaluation of direct current magnetron sputtered and high-power impulse magnetron sputtered Cr coatings on SiC for light water reactor applications // Thin Solid Films. 2020. V. 716. P. 138431.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАБУХАНИЯ ПОЛИ(*n*-ДЕЦИЛ МЕТИЛ СИЛОКСАНА) В ГАЗООБРАЗНЫХ *n*-АЛКАНАХ

Метод спектроскопической эллипсометрии был впервые применен для исследования сорбции и набухания поли(*n*-децил метил силоксана) (С10) в атмосфере газообразных *n*-алканов (СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>, *n*-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>). На основе эллипсометрических данных были рассчитаны изотермы сорбции и набухания С10 в углеводородах, оценены плотности сорбированных С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и *n*-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>, а также их коэффициенты растворимости при  $p \rightarrow 0$ .

S.E. SOKOLOV, S.T. SMIRNOVA, T.N. ROKHMANKA, E.A. GRUSHEVENKO

A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis, RAS, Moscow, Russia

SPECTROSCOPIC ELLIPSOMETRY INVESTIGATION OF SWELLING OF POLY(*n*-DECYL METHYL SILOXANE) IN GASEOUS *n*-ALKANES

The spectroscopic ellipsometry was firstly used to study the sorption and swelling of poly(*n*-decyl methyl siloxane) (C10) in gaseous hydrocarbons (СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>, *n*-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>). Based on ellipsometric data, we determined sorption and swelling isotherms of C10 in hydrocarbons, estimated densities of sorbed С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> and *n*-С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> and their solubility coefficients at  $p \rightarrow 0$ .

Поли(*n*-децил метил силоксан) (С10) – гребнеобразный высокоэластичный полимер, перспективный для задач мембранного разделения газообразных углеводородов [1]. В данной работе мы впервые исследовали поведение тонких слоев ( $L < 300$  нм) С10 в атмосфере *n*-алканов методом спектроскопической эллипсометрии (СЭ). СЭ – поляризационно-оптический метод исследования поверхностей раздела фаз, привлекательный для различных прикладных задачи, в частности, для задач мембранного материаловедения.

Эллипсометрические измерения показали, что в атмосфере углеводородов изменяются толщина полимерного слоя и его коэффициент преломления. Из изменения толщины полимера были получены изотермы сорбции углеводородов в С10, представленные на рис. 1 в виде зависимости объемной доли сорбата  $\varphi$  от давления  $p$ . Как видно из рис. 1, с увеличением массы углеводорода его объемная доля в полимере растет. Для этана и *n*-бутана изотермы оказываются выпуклыми к оси давлений. Полученные изотермы были описаны уравнением Флори-Хаггинса, аппроксимация уравнением представлена на рис. 1. Полученные для полимера С10 параметры взаимодействия  $\chi$  составили  $0.25 \pm 0.20$  для СН<sub>4</sub>,  $0.50 \pm 0.05$  для С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и  $0.51 \pm 0.03$  для С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub>. Они оказываются больше тех, что получены ранее для полидиметилсилоксана [2], что связано как со сшивкой полимера, так и с влиянием его бокового заместителя.

Из изменения коэффициента преломления были оценены молярные объемы сорбированных этана и *n*-бутана. Они составили  $77 \pm 3$  и  $137 \pm 5$  см<sup>3</sup>/моль, соответственно. Эти значения оказываются выше значений их критических плотностей, но ниже плотности жидкого углеводорода в нормальной точке кипения. Полученные результаты также позволили оценить коэффициенты растворимости углеводородов  $S_0$  при  $p \rightarrow 0$ . Для С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> они составили  $1.7 \pm 0.2$  и  $16.4 \pm 1.2$  см<sup>3</sup>(СТР)/(см<sup>3</sup> атм), соответственно.

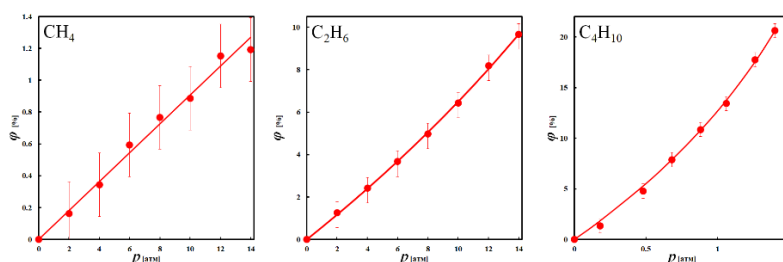


Рис. 1. Изотермы (22 °С) сорбции СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и С<sub>4</sub>Н<sub>10</sub> в С10 и их аппроксимация уравнением Флори-Хаггинса.

## Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 23-79-10265, <https://rscf.ru/project/23-79-10265/>). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Аналитический центр проблем глубокой переработки нефти и нефтехимии» ИНХС РАН.

## Список литературы

1. Grushevenko E.A., Borisov I.L., Bakhtin D.S. and others // React. Funct. Polym. 2019. Vol. 134. P. 156-165.
2. Kamiya Y., Naito Y., Terada K. and others // Macromol. 2000. Vol. 33. №. 8. P. 3111-3119.

В.Г. СРЕДИН<sup>1</sup>, А.А.СТЕПАНЕНКО<sup>2</sup>, А.П. МЕЛЕХОВ<sup>2</sup>, Р.Ш. РАМАКОТИ<sup>2</sup>, К.С. АНДРЕЙЧИКОВ<sup>3</sup>

1. Военная академия РВСН им. Петра Великого, г. Балашиха МО, Россия  
2. Национальный ядерный исследовательский университет (МИФИ), Москва, Россия  
3. АО «МЗ «Сапфир», Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА АНТИМОНИД ИНДИЯ - ПОВЕРХНОСТНЫЙ АНОДНЫЙ ОКИСЕЛ

Рассмотрено влияние облучения мягкого рентгеновского излучения на структуру анодный поверхностный окисел – антимонид индия. Показано, что изменение ее характеристик вероятно связано с возникновением заряженных состояний в слое окисла.

SREDIN V.G.<sup>1</sup>, STEPANENKO A.A.<sup>2</sup>, MELEKHOVA P.<sup>2</sup>, RAMAKOTIR S.<sup>2</sup>, ANDREICHIKOV K.S.<sup>3</sup>

1. Military Academy of the Strategic Missile Forces Peter the Great, Balashikha, Russia  
2. National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia  
3. JSC MH SAPPHIRE Moscow, Russia

## EFFECT OF SOFT X-RAY RADIATION ON THE PROPERTIES OF THE INDIUM ANTIMONIDE-SURFACE ANODIC OXIDE INTERFACE

The effect of irradiation with soft X-ray radiation on the structure of the anodic surface oxide – indium antimonite – is considered. It is shown that the change in its characteristics is probably associated with the appearance of charged states in the oxide layer.

Мягкое рентгеновское излучение (МРИ) предполагается использовать для проведения процедур фотолитографии на этапе перехода микроэлектроники на следующий уровень технологических размеров. При этом главную роль здесь играют процессы взаимодействия МРИ с фоторезистивными материалами, но определенный интерес представляет также изучение влияния МРИ и на свойства полупроводников. Эта проблема может рассматриваться также как часть более общей - проблемы дефектообразования рентгеновским излучением (РИ) в твердом теле [1]. Предполагалось, что к генерации точечных дефектов в объеме материала приводит появление «выделенной группы ионов», возникающих в результате возбуждения электронов внутренних электронных оболочек ионов решетки квантами РИ с последующим их кулоновским отталкиванием. В полупроводниках, в том числе и в InSb, динамика дефектов, генерируемых РИ, не вполне совместима с этой моделью. В отличие от коротковолнового РИ мягкий рентген поглощается в тонком приповерхностном слое полупроводника, вследствие внешнего фотоэффекта, который исследовался нами в кристаллах InSb и твердых растворах CdHgTe [2].

Ранее нами исследовалось действие облучения МРИ лазерной плазмы структур анодный окисел- антимонид индия [3]. Измерения вольт-фарадных характеристик этих структур показали образование в приповерхностной области заряженных центров, локализация которых не установлена. Для оценки вероятности генерации радиационных дефектов в приповерхностной области InSb по аналогии со структурами на основе твердых растворов CdHgTe [2] нами была проведена теоретическая оценка энергии связи иона In в тетраэдрическом окружении ионов Sb. С этой целью моделировался потенциал парного взаимодействия для иона In, расположенного в центре тетраэдрической ячейки, образованной ионами Sb. Трехчастичное взаимодействие ионов, не учитывалось, как эффект следующего порядка малости. Полный потенциал взаимодействия иона In с ионами Sb элементарной ячейки брался в виде суммы потенциалов по всем парам ионов, входящих в ближайшее его окружение, с учётом вклада от внешнего приложенного электрического поля  $E$ . Результат расчета при  $E = 3$  ГВ/м представлен на рис. 1. Положению равновесия иона In соответствует минимум потенциала, причем амплитуда смещения иона от положения равновесия порядка 1 Å. Глубина потенциальной ямы составляет около 3.5 эВ, что делает невозможным туннельный выход иона из ямы под действием электрических полей, генерируемых за счет внешнего фотоэффекта с образованием точечного дефекта на поверхности кристалла. Более вероятной представляется захват фотоэлектронов ловушечными состояниями анодного окисла. Подобные эффекты наблюдались при облучении МРИ окислов Si [4].

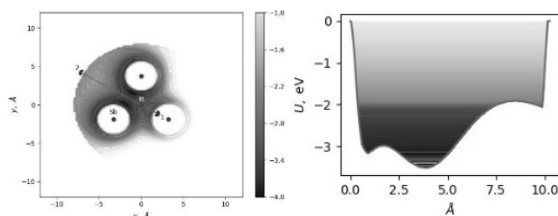


Рис. 1. Распределение потенциала взаимодействия иона In с ближайшим окружением вдоль линии 1-2 при включении внешнего электрического поля  $E = 3$  ГВ/м. Точками изображены невозмущенные положения ионов в кристаллической решетке. Поле ориентировано в вдоль вектора  $e = (-1, 1)$ .

### Список литературы

1. Клингер Ж.И., Пушин Ч. В., Машовец Т.В., Холодарь, Г.А, Шейнкман М.К., Эланго М.А. УФН.1985.т.147. №3. С.524-558.
2. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Несмелов С.Н, Дзядух С.М. Прикладная физика. 2018. № 4 С. 54-60.
3. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Степаненко А.А., Мелехов А.П., Рамакоти Р.Ш., Юрчак В.А., Дзядух С.М., Андрейчиков К.С. В сборнике: Актуальные проблемы радиофизики АПР-2023. Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Томск, 2023. С. 296-297.
4. C.K.Wiliams, A.Reisman et al. J.Appl.Phys. 1988. V.63.№3. P.1145-1151.

## СРАВНЕНИЕ НАГРУЗОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКСИАЛЬНОГО И РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ВТСП ЛЕНТ

Проведено исследование нагрузочных характеристик аксиального и радиального подшипников на основе современных сверхпроводящих лент. Получены и проанализированы зависимости вертикальных и латеральных сил от величины соответствующего сдвига, проведено сравнение устойчивости подшипников. Измерения проведены при температуре жидкого азота в разных режимах охлаждения.

A.S. STARIKOVSKII, M.A. OSIPOV, I.A. RUDNEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## COMPARISON OF LOAD CHARACTERISTICS OF AXIAL AND RADIAL BEARINGS BASED ON HTS TAPES

A study of the load characteristics of axial and radial bearings based on modern superconducting tapes has been carried out. The dependences of vertical and lateral forces on the magnitude of the corresponding displacement were obtained and analyzed, and the stability of bearings was compared. The measurements were carried out at liquid nitrogen temperature in different cooling modes.

Одним из перспективных вариантов снижения потерь в кинетических накопителях энергии является использование бесконтактных подшипников. Можно выделить два типа подшипников: опорные или аксиальные (сверхпроводник находится ниже постоянных магнитов) и радиальные подшипники (сверхпроводник находится вокруг постоянных магнитов). ВТСП ленты в виде незамкнутых кольцевых обмоток имеют большой потенциал для создания таких устройств и достаточно хорошо изучены. В то же время опорные сверхпроводящие подшипники собираются из стопок ВТСП лент [1], что осложняет процесс их изготовления. Исследований данного типа подшипников на основе сверхпроводящих лент в литературе меньше, а главное, нет работ по прямому сравнению опорных и радиальных подшипников.

Для прямого сравнения нагрузочных характеристик подшипников аксиальной и радиальной геометрий, были изготовлены и исследованы прототипы подшипников данных типов, в которых использовался одинаковый объем постоянных магнитов в роторе и одинаковое количество сверхпроводящей ленты. Аксиальный подшипник состоял из ротора, собранного из постоянных магнитов с одинаковым направлением намагничивания, создающим поле, перпендикулярное статору, собранному из стопок ВТСП лент. Радиальный подшипник состоял из ротора, собранного из двух постоянных магнитов противоположного направления намагничивания, соединенных магнитопроводом, что создавало радиальное магнитное поле, перпендикулярное плоскости статора из незамкнутых обмоток на основе ВТСП лент. Проведено исследование устойчивости разных типов подшипников, измерены зависимости возникающих вертикальных и латеральных сил от величины соответствующего сдвига ротора от положения охлаждения. Измерения проведены при температуре жидкого азота как в режиме охлаждения в поле, так и в режиме охлаждения в нулевом поле.

По результатам измерений было получено, что радиальный подшипник демонстрирует большие значения силы. Так, вертикальная возвращающая сила в режиме охлаждения в поле при смещении на 8 мм от положения охлаждения превышает силу аксиального подшипника в 7 раз. В режиме охлаждения в нулевом поле максимальная сила отталкивания радиального подшипника тоже больше, однако, расстояние, на котором она начинает возрастать, в 2 раза уступает подшипнику с аксиальной геометрией, что говорит об эффективности использования аксиального подшипника в качестве опорного. Для обеих конфигураций так же были получены сведения о латеральной устойчивости подшипников при боковых смещениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00394, <https://rscf.ru/project/23-19-00394/>.

### Список литературы

1. Patel A. et al. Magnetic levitation between a slab of soldered HTS tape and a cylindrical permanent magnet //IEEE Transactions on Applied Superconductivity.2016.Vol. 26, № 3. P. 1-5.

## КАКОВА ТОЛЩИНА ФРОНТА ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА?

Проделана оценка толщины фронта плавления льда (на воздухе при комнатной температуре и в охлажденной воде при +1°C). Она оказалась равной примерно 3 мм.

I.S. STEPANOV<sup>1</sup>, L.I. BUDAEVA<sup>2</sup>, O.A. RAZNITSYN<sup>2</sup>, M.V. KARPOV<sup>2</sup>, S.V. STEPANOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

## WHAT IS THE THICKNESS OF THE ICE MELTING FRONT?

Estimation of the thickness of the ice melting front is carried out (in air at room temperature and in cold water, +1 °C). In both cases it resulted in approximately 3 mm.

На основе проведенных нами измерений кинетики накопления талой воды при плавлении ледяных шаров разного размера при комнатной температуре, а также с учетом измерений температуры, как на поверхности шаров, так и внутри них, удалось оценить толщину фронта плавления льда [1]. Внутри фронта плавления тепловой поток снаружи из воздуха поглощается льдом в виде скрытой теплоты плавления, в результате чего на поверхности шара образуется тонкая ( $\leq 0.1$  мм) пленка талой воды. В ходе плавления льда вода стекает с подвешенного шара и собирается в стакане, установленном на весах.

Построена модель, описывающая кинетику таяния ледяных шаров. Предполагалось, что подвод тепла происходит через всю поверхность шара, при этом учитывалось уменьшение площади поверхности со временем. Также измерялась температура на поверхности ледяных шаров и температуры внутри них (эти значения оказались  $\sim 0.4$  и  $0$  °C соответственно). Кинетика накопления талой воды имеет простой вид  $\sim 1 - [1 - t/(3t_0)]^3$ . Учитывались поправки, связанные с испарением воды. Подгонка экспериментальных данных с использованием предложенной модели позволила оценить толщину фронта плавления льда при комнатной температуре, которая оказалась равной примерно 3.2-3.6 мм (Рис. 1).

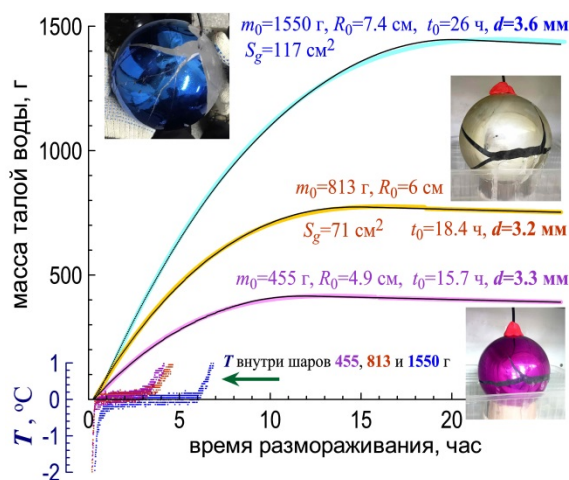


Рис. 1. Кинетики накопления талой воды в ходе таяния шаров разной начальной массы. Сплошные кривые показывают фитирование экспериментальных данных с использованием предложенной модели. При обработке данных также учитывалось, что в первые 10-20 минут лёд прогревался от температуры морозильной камеры до температуры плавления. При этом образование талой воды еще не началось. Внизу показаны зависимости температуры внутри ледяных шаров, измеренные термодатчиком DS18B20. Видно, что в процессе плавления температура внутри шаров равнялась 0 °C. Последующий рост температуры связан с выходом термодатчика из объема шара на его поверхность и наличием контакта с теплым воздухом.

Проведена серия опытов по таянию ледяных шаров в бидистилляте при температуре около +0.6 °C. Температура воды поддерживалась при помощи термостата. Ледяные шары подвешивались на тонкой проволоке к штативу, установленному на весах. Кинетика плавления определялась по изменению архимедовой силы. Полученная оценка толщины фронта плавления согласуется с измерениями, проведенными на воздухе.

### Список литературы

1. И.С. Степанов, Л.И. Будаева, С.В. Степанов «Оценка толщины фронта плавления льда, основанная на исследовании кинетики таяния ледяных шаров в воздухе» Коллоидный журнал, Т.86 (3), 2024 <https://colljour.phyche.ac.ru/papers/860306/>.

А.К. ТАШАТОВ, Н.М. МУСТАФОЕВА, С.Н. ЭШБОБОЕВ  
Каршинский государственный университет, Карши, Узбекистан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРИНЫ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ NiSi<sub>2</sub>

В работе имплантацией ионов Ni<sup>+</sup> в Si сочетании с отжигом в приповерхностном слое Si на глубине 15-25 nm получены нанокристаллические фазы и слои NiSi<sub>2</sub>. При D=8·10<sup>16</sup> см<sup>-3</sup> формировались нанопленочная гетероструктура типа Si/NiSi<sub>2</sub>/Si. Впервые оценены ширины запрещенных зон нанокристаллических фаз и слоев NiSi<sub>2</sub>, созданных в приповерхностной области Si.

A.K. TASHATOV, N.M. MUSTAFOYEVA, S.N. ESHBOBOYEV  
Karshi State University, Karshi, Uzbekistan

## INVESTIGATION OF THE BAND GAP OF HIDDEN NiSi<sub>2</sub> NANOCRYSTALS

Nanocrystalline phases and NiSi<sub>2</sub> layers were obtained by implantation of Ni<sup>+</sup> ions in Si in combination with annealing in the near-surface Si layer at a depth of 15-25 nm. At D=8·10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>, a thin-film heterostructure of the Si/NiSi<sub>2</sub>/Si type was formed. The band gap widths of nanocrystalline phases and NiSi<sub>2</sub> layers created in the near-surface region of Si have been estimated for the first time.

Объектами исследования являлись монокристаллические образцы Si(111) n-типа. Скрытые нанокристаллические фазы и сплошные слои NiSi<sub>2</sub> в приповерхностном слое Si получены имплантацией ионов Ni<sup>+</sup> с вариацией энергии E<sub>0</sub> от 15 до 30 кэВ и дозы от 10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup> до 10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup> с последующим отжигом при температуре формирования нанокристаллических структур NiSi<sub>2</sub>[1,2].

Из ДБЭ картины (рис 1, вставка) видно, что пленки Si, сформированные на поверхности системы Si/NiSi<sub>2</sub>/Si(111), имеет монокристаллическую структуру с кубической решеткой. Из-за того, что значение постоянной решетки NiSi<sub>2</sub> (a ≈ 5,42 Å) практически не отличается от a чистого Si(5,41 Å) на границах раздела Si/NiSi<sub>2</sub> и NiSi<sub>2</sub>/Si(111) формируется очень узкие (d ≤ 3-5 nm) переходные слои.

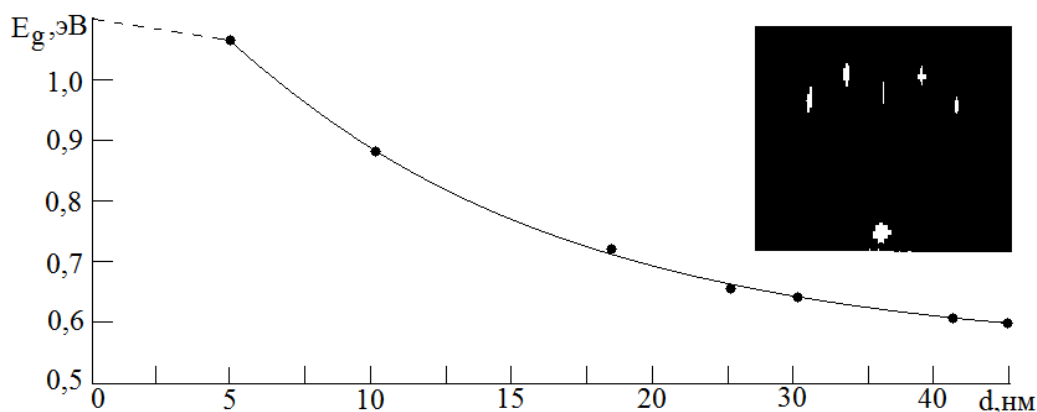


Рис.1. Зависимость E<sub>g</sub> от размеров НК фаз NiSi<sub>2</sub>. На вставки ДБЭ картина поверхности системы Si/NiSi<sub>2</sub>/Si(111).

Таким образом впервые методом имплантации ионов Ni<sup>+</sup> в Si с энергией 15-30 кэВ в сочетании с прогревом в приповерхностной области Si получены наноразмерные структуры NiSi<sub>2</sub>. Ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз с ростом их диаметра от 5 nm до 35 nm изменялась в пределах от ~1,05 до 0,6 эВ. При дозе D ≈ 8·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> образуется нанопленочная система типа Si/NiSi<sub>2</sub>/Si(111). Показано, что E<sub>g</sub> нанослоев NiSi<sub>2</sub> равна ~ 0,57 эВ.

### Список литературы

1. Tashatova A. K., Mustafoyeva N. M. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 81–84.
2. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М., Ташмухамедова Д.А., Нормуродов М.Т., Абдуваитов А.А. Получение многофазной наносистемы Si/NiSi<sub>2</sub>/Si (111) // XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 2019 г с.38.

## МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ СКРЫТЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ NiSi<sub>2</sub>, СОЗДАНЫХ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Нанокристаллические структуры получены имплантацией ионов Ni<sup>+</sup> в Si(111) с энергией E<sub>0</sub>=25 кэВ с вариацией дозы ионов в пределах 10<sup>14</sup>-10<sup>17</sup> см<sup>-2</sup>. Установлена взаимосвязь между изменениями размеров и шириной запрещенной зоны скрытых нанокристаллических фаз NiSi<sub>2</sub>. Определены размеры нанофаз, при которых начинает проявляться квантово-размерные эффекты.

A.K. TASHATOV, N.M. MUSTAFOEVA, N.M. MUSTAFAEVA, Z.V. KOCHNEVA  
Karshi Institute of Irrigation and Agricultural Technologies, Karshi, Uzbekistan

## MECHANISMS OF FORMATION OF HIDDEN NiSi<sub>2</sub> NANOCRYSTALS CREATED BY IONIC IMPLANTATION METHOD

Nanocrystalline structures were obtained by implanting Ni<sup>+</sup> ions into Si(111) with energy E<sub>0</sub>=25 keV with a variation of the ion dose in the range of 10<sup>14</sup>-10<sup>17</sup> cm<sup>-2</sup>. A relationship has been established between changes in size and band gap of hidden NiSi<sub>2</sub> nanocrystalline phases. The sizes of nanophases at which quantum-size effects begin to appear have been determined.

Нанопленочные гетероструктуры типа MeSi<sub>2</sub>/Si являются предметом интенсивного исследования, вследствие перспективности их в создании МДП, ПДП-структур для СВЧ-транзисторов и интегральных схем, детекторов излучения, солнечных элементов, оптоэлектронных приборов, тонких омических контактов и барьерных слоев. [1,2]. Основные исследования проводились для Si имплантированного ионами Ni<sup>+</sup> с энергией E<sub>0</sub>=25 кэВ. Были подготовлены 5 одинаковых, хорошо обезгаженных образцов Si(111). Эти образцы имплантировались ионами Ni<sup>+</sup> с E<sub>0</sub>=25 кэВ при дозах D, см<sup>-2</sup>; 0 (чистый Si, образец №1), 2·10<sup>14</sup> (№2); 2·10<sup>15</sup> (№3) и 8·10<sup>15</sup> (№4) и 8·10<sup>16</sup> (№5). Последняя доза соответствует дозе насыщения.

На рис. представлен схематический размер нанофаз и нанослоя. Можно полагать, что до дозы D≈10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> нанокристаллические фазы NiSi<sub>2</sub> формируются в виде сфер [1], а при D>10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> переходят в форму близкую к эллипсоиду и при D=8·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> образуется сплошной однородный слой NiSi<sub>2</sub>.

Расчеты показали, что объем нанокристаллической фазы NiSi<sub>2</sub> для образца №3 составляет (2-3)·10<sup>-18</sup> см<sup>3</sup>, а для образца №4 – (8-10)·10<sup>-18</sup> см<sup>3</sup>. Эти наноструктуры формируются на глубине 22-24 нм.

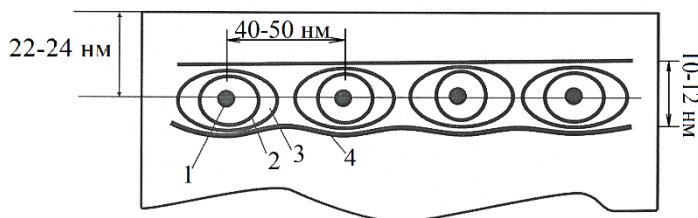


Рис. 1. Схематические изображения нанофаз (1-3) и нанослоя (4) NiSi<sub>2</sub> расположенных в приповерхностном слое Si. 1-D=2·10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>; 2-2·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>; 3-8·10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>; 4-8·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup>

Для этих образцов были сняты зависимости интенсивности I проходящего, через образец, света от энергии фотонов в интервале hv=0,4-1,2 eV. Здесь  $I = I_{NiSi_2} / I_{Si}$ , где I<sub>Si</sub> – интенсивность света, проходящего через чистый Si, а I<sub>NiSi<sub>2</sub></sub> – через Si, с внутренними наночастицами (слоями) NiSi<sub>2</sub>.

Таким образом, впервые методом имплантации ионов Ni<sup>+</sup> в Si с энергией 15-30 кэВ в сочетании с прогревом в приповерхностной области Si получены наноразмерные структуры NiSi<sub>2</sub>. Ширина запрещенной зоны нанокристаллических фаз с ростом их размеров от (1-1,2)·10<sup>-18</sup> см<sup>-3</sup> до (3-3,5)·10<sup>-18</sup> см<sup>-3</sup> изменялась в пределах от 0,7 до 0,9 eV. При дозе D≈8·10<sup>16</sup> см<sup>-2</sup> образуется нанопленочная система типа Si/NiSi<sub>2</sub>/Si. Показано, что E<sub>g</sub> нанослоев NiSi<sub>2</sub> равна ~ 0,57 eV.

### Список литературы

1. Tashatova A. K., Mustafoyeva N. M. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2020, Vol. 14, No. 1, pp. 81–84.
2. Ташатов А.К., Мустафоева Н.М., Ташмухамедова Д.А., Нормуродов М.Т., Абдуваитов А.А. Получение многомлойной наносистемы Si/NiSi<sub>2</sub>/Si (111)// XLIX международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва 2019 г с.38.



Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА<sup>1</sup>, Б.Е. УМИРЗАКОВ<sup>1</sup>, М.Б. ЮСУПЖАНОВА<sup>1</sup>,  
С.Т. АБРАЕВА<sup>1</sup>, М.М. МАХМУДОВ<sup>1</sup>, Н.А. МАРОЗИКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Маргилонское профессионально-техническое училище №1, Узбекистан

## ИЗМЕНЕНИЕ СПЕКТРА УПРУГООТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО Ge ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ

С использованием методов спектроскопии упругоотраженных электронов изучено влияние ионной бомбардировки на кристаллическую структуру, состав, энергию возбуждения плазменных колебаний и межзонных переходов монокристаллического Ge.

D.A. TASHMUKHAMEDOVA<sup>1</sup>, B.E. UMIRZAKOV<sup>1</sup>, M.B. YUSUPJANOVA<sup>1</sup>,  
S.T. ABRAEVA<sup>1</sup>, M.M. MAXMUDOV<sup>1</sup>, N.A. MAROZIKOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Margilon Vocational School No. 1, Uzbekistan

## CHANGES IN THE SPECTRUM OF ELASTICALLY REFLECTED ELECTRONS OF MONOCRYSTALLINE Ge DURING ION BOMBARDING

Using the methods of elastically reflected electron spectroscopy, the effect of ion bombardment on the crystal structure, composition, excitation energy of plasma oscillations and interband transitions of single-crystal Ge was studied.

В данной работе изучено изменения положения максимумов плотности состояния валентных электронов, образование химической связи между атомами и количество заряда, передаваемого катионом аниону в процессе ионной бомбардировки поверхности монокристаллического Ge. Величина энергии связи остовых электронов весьма чувствительна к изменению плотности состояний валентных электронов [1, 2]. Следовательно, образование любых химических связей между атомами должно приводить к смещению положений остовных уровней. На рис. 1 приведены спектры УОЭ  $M_{45}Ge$  бомбардированного ионами  $Ar^+$ ,  $Na^+$  и  $O_2^+$  с  $E_0 = 1$  кэВ до и после прогрева. Из рис. 1 видно, что после бомбардировки ионами  $Ar^+$  положение  $M_{45}$  пика Ge заметно не меняется, а при имплантации ионов  $Na^+$  - положение пика  $M_{45}$  смещается в сторону меньших энергий, а при имплантации ионов  $O_2^+$  - в сторону больших энергий.

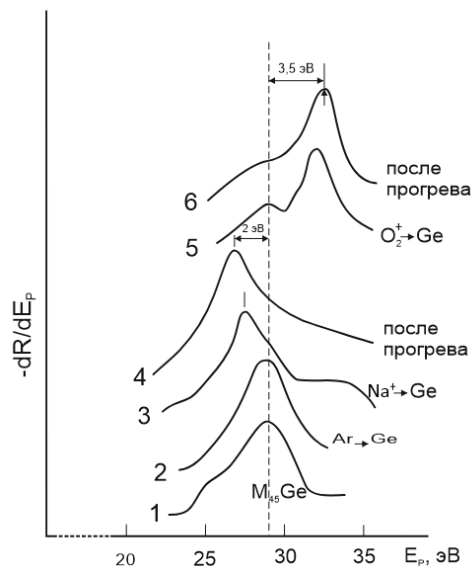


Рис. 1. Спектры УОЭ  $M_{45}Ge$

бомбардированного ионами  $Ar^+$ ,  $Na^+$  и  $O_2^+$  с  
 $E_0 = 1$  кэВ при  $D = 8 \cdot 10^{16}$  см<sup>-2</sup> до (кривые 1,  
2 и 5) и после прогрева при  $T = 750$  К (4) и

Это связано с тем, что образование соединений типа Ge + Na сопровождается переходом электронов от атома Na к атому Ge, что и приводит к уменьшению энергии связи электронов матрицы. В случае же окиси кремния, наоборот, последний отдает свои электроны кислороду и, следовательно, энергия связи электронов кремния увеличивается.

### Список литературы

1. Gavrilov S.A., Dronov A.A., Gavrilin I.M., Volkov R.L., Borgardt N.I., Trifonov A.Yu., Pavlikov A.V., Forsh P.A., Kashkarov P.K. Journal of Raman Spectroscopy, 49, 781 (2018).
2. Ташмухамедова Д.А., Юсупжанова М.Б., Ташатов А.К., Умирзаков Б.Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. Т. 9. С. 78. Doi: 10.1134/S0207352818090111.

И.А. ТЕРЕЩЕНКО<sup>1,2</sup>, О.В. ТИХОНОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ НАНОСИСТЕМ КВАНТОВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Аналитически исследована динамика квантовых состояний джозефсоновского квантового нелинейного осциллятора под действием неклассических полей. Выявлены особенности формирования различных квантовых состояний и их динамики, обусловленные как Керровской нелинейностью самой системы, так и нелинейным воздействием внешних неклассических полей.

I.A. TERESHCHENKO<sup>1,2</sup>, O.V. TIKHONOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## CONTROLLING THE DYNAMICS OF JOSEPHSON NANOSYSTEMS INDUCED BY QUANTUM ELECTROMAGNETIC FIELDS

The dynamics of quantum states of a Josephson quantum nonlinear oscillator under the action of nonclassical fields is analytically investigated. The peculiarities of the formation of different quantum states and their dynamics are revealed due to both the Kerr nonlinearity of the system itself and the nonlinear effect of external non-classical fields.

Современные системы для создания квантовых операций используют различные методы кодирования информации, включая кубиты и квантовые фотонные состояния. Так, искусственные твердотельные атомы на основе эффекта Джозефсона представляют собой перспективные объекты для разработки квантовых схем и хранения информации [1]. Свойствами и состояниями таких систем можно управлять с помощью электромагнитных квантовых полей. Например, становится возможной контролируемая передача возбуждения от одного кубита к другому за счет варьирования параметров кубита внешним полем. Таким образом, взаимодействие между сверхпроводящими джозефсоновскими наносистемами и электромагнитными полями представляет собой интересное направление исследований, в особенности с точки зрения анализа роли нелинейности, характерной для обеих подсистем.

В работе осуществляется теоретическое моделирование работы планарных схем на основе джозефсоновских наноструктур за рамками линейного режима. Проведен детальный анализ влияния неклассических свойств поля на процессы возбуждения кубитов и искусственных джозефсоновских атомов, проведена разработка методов управления кубитами. В результате, были обнаружены различные квантовые эффекты, обусловленные взаимодействием квантового поля с джозефсоновской подсистемой и возможным наличием нелинейности у обеих подсистем.

В качестве примера рассмотренных в работе джозефсоновских систем можно привести кубит-трансон, динамика которого была рассмотрена с учетом нелинейности самой системы, а также при воздействии внешней параметрической накачки. В общем случае решение было найдено численно, однако за рамками теории возмущений было получено аналитическое решение при учете каждого типа нелинейности в отдельности в режиме сильной связи атома и поля. В результате анализа было показано, что наличие параметрической нелинейности способствует неограниченному передаче энергии от накачки к сверхпроводящей подсистеме (см. рис.1).

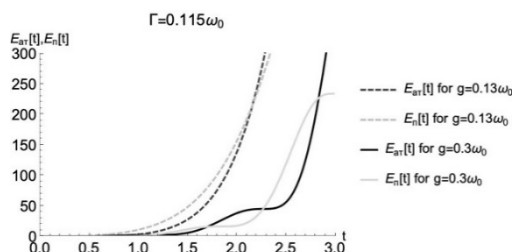


Рис. 1. Временные зависимости энергий твердотельной и полевой подсистем при различных соотношениях коэффициента связи между подсистемами  $g$  и полевой нелинейностью  $\Gamma$ .

Обнаружено формирование сжатых состояний нелинейного джозефсоновского осциллятора, сопровождающееся сильным подавлением флуктуаций выходного тока или напряжения, что открывает новые возможности для разработки схем сверхточных измерений на основе сверхпроводящих джозефсоновских систем. Также продемонстрировано, что наличие Керровской нелинейности позволяет управлять квантовыми состояниями трансона счет варьирования частотной отстройки квантового поля от резонансного перехода.

Работа выполнена при поддержке фонда «Базис» (грант №23-2-1-33-1).

### Список литературы

1. Friedman J. R., Patel V., Chen W., Tolpygo S.K., Lukens J.E. // Nature. 2000. Vol. 406, P. 43-45.

У. ТУРАЕВА<sup>1,2</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Бухарский государственный университет, Бухара, Узбекистан

<sup>2</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова, Ташкент, Узбекистан

<sup>3</sup>Антверпенский университет, Антверпен, Бельгия

## КОНТРОЛЬ ШЕРОХОВАТОСТИ ИНТЕРФЕЙСА $Ni_xO_y/Ni$

КПД солнечных устройств зависит от «параметра селективности» поглощающей поверхности. Для контроля шероховатости необходимо выбрать соответствующие параметры роста. Для лучшего понимания этого явления процесс осаждения молекул  $Ni_xO_y$  на поверхность Ni(111) был изучен методом моделирования с использованием метода реактивной молекулярной динамики.

U. TURAEVA<sup>1,2</sup>, U. KHALILOV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Bukhara State University, Bukhara, Uzbekistan

<sup>2</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

<sup>3</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## ROUGHNESS CONTROL OF $Ni_xO_y/Ni$ INTERFACE

The efficiency of solar devices depends on the 'selectivity parameter' of the absorbing surface. Controlling the roughness requires choosing the appropriate growth parameters. To gain a better understanding of this phenomenon, the deposition process of  $Ni_xO_y$  molecules on the Ni(111) surface was studied through simulation using the reactive molecular dynamics method.

Эффективность солнечных устройств зависит от «параметра селективности» их поглощающих поверхностей [1]. Ведутся интенсивные исследования по выявлению материалов с высокими «параметрами селективности» [2]. Однако связь между длиной волны падающего света ( $\lambda$ ) и шероховатостью поверхности ( $\Delta h$ ) для структуры  $Ni_xO_y/Ni$ , многообещающей поглощающей поверхности с высоким «параметром селективности» еще не изучена.

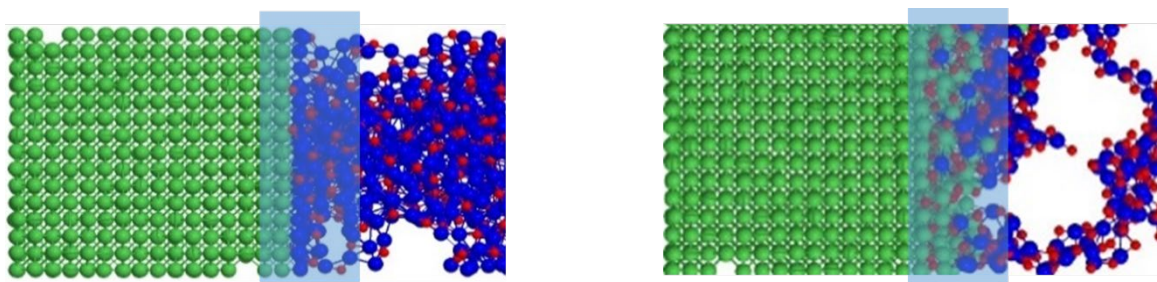


Рис. 1: Шероховатость интерфейса при осаждении молекул  $NiO_2$  и  $Ni_2O$  на поверхность Ni(111)

В данной работе мы исследовали процесс осаждения  $Ni_2O$  и  $NiO_2$  молекул на поверхность Ni(111) при температуре 350К с использованием метода реактивной молекулярной динамики [3]. Результаты показывают, что при нанесении молекул оксида  $Ni_2O$  на поверхность Ni(111) молекулы распределяются равномерно, что приводит к практически нулевой шероховатости поверхности (рис. 1, слева). С другой стороны, при осаждении  $NiO_2$  на границе Ni(111) происходит объемная диффузия, образующая отчетливый «пограничный» слой между поверхностями (рис. 1, справа). В целом полученные данные свидетельствуют о том, что доля атомов кислорода в молекулах  $Ni_xO_y$  увеличивается вместе с концентрацией диффундирующих атомов кислорода. Это увеличение, следовательно, приводит к увеличению шероховатости интерфейса.

### Список литературы

1. Захидов Р.А. Гелиотехника, 2008. - №1. – С.89-96.
2. Абдурахманов А., Тураева У.Ф., Клычев Ш.И. Гелиотехника, 2008. - №4. – С. 50-53.
3. Khalilov, U.; Neyts, E. C.; Pourtois, G.; van Duin, A. C. T. J. Phys. Chem. C 2011, 115, 24839–24848.

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАТОНКОЙ ПЛЕНКИ ZnO, ОСАЖДЕННОЙ МЕТОДОМ АТОМНО-СЛОЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ

В исследовании использовался метод термального атомного слоевого осаждения для создания равномерной тонкой пленки ZnO на монокристаллической пластине кремния. Осаждение пленки проводилось при 200 °С, с использованием в качестве прекурсоров диэтилцинк (DEZ) и воды. Анализ проводился с использованием метода спектральной эллипсометрии в диапазоне волн 240–600 нм. Исследование позволило оценить толщину пленки ZnO, а также оптические константы на основе результатов спектральной эллипсометрии.

T.K. TURDALIEV, KH.KH. ZOKHIDOV, KH.B. ASHUROV

Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies of Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

## OPTICAL PROPERTIES OF ULTRA-THIN ZnO FILM DEPOSITED BY ALD METHOD ON SILICON SUBSTRATE

The study employed the method of thermal atomic layer deposition to produce a uniform thin film of ZnO on a monocrystalline silicon wafer. Film deposition was conducted at 200 °C, utilizing diethylzinc (DEZ) and water as precursors. Analysis was carried out using spectral ellipsometry in the wavelength range of 240–600 nm. The research allowed for the evaluation of the ZnO film thickness and optical constants based on the spectral ellipsometry results.

ZnO представляет собой универсальный полупроводник с прямой широкой запрещенной зоной около 3,37 эВ и значительной энергией связи экситона, достигающей 60 мэВ при комнатной температуре. Тонкие пленки ZnO широко применяются в светодиодах, солнечных батареях, газовых датчиках, оптоэлектронных устройствах и многих других областях. Особенно привлекательна высокая прозрачность ZnO в видимом спектре, что раскрывает широкие перспективы его использования в оптических устройствах, включая солнечную энергетику [1]. Для создания тонких наноструктурированных пленок ZnO используются разнообразные методы, включая химическое осаждение из газовой фазы, гидротермальный рост, молекулярно-лучевую эпитаксию, MOCVD, магнетронное распыление, лазерную абляцию и другие передовые технологии [2].

Осаждение ZnO-пленки было выполнено с применением метода атомного слоевого осаждения на установке «Veeco Savannah S200 ALD». В процессе осаждения использовались диэтилцинк (DEZ) и вода (H<sub>2</sub>O) в качестве прекурсоров. Температура подложки была установлена на уровне 200 °С. Каждый цикл процесса включал 11 шагов, а продолжительность одного цикла составляла 2655 миллисекунд, и общее количество циклов составило 400. Поток азота, который использовался в качестве транспортного и продувочного газа, составил 100 стандартных кубических сантиметров в минуту. Для оценки оптических свойств ZnO-пленки был применен метод спектральной эллипсометрии с использованием прибора SENTECH Instruments - SER850 в диапазоне волн 240–600 нм при угле падения 70°. Последующий анализ эллипсометрических данных осуществлялся с использованием программного обеспечения SenResearch4. Для интерпретации эллипсометрических спектров  $\Psi$  и  $\Delta$  слоя ZnO применялась модель Тауца-Лоуренца [3]. В результате сопоставления экспериментальных и эллипсометрических данных (см. рисунок 1 (а)), были определены показатели преломления  $n$  и коэффициент экстинкции  $k$  (рисунок 1 (б)). Минимальное значение среднеквадратичного отклонения составило MSE=0.95 при толщине пленки 49 нм. Коэффициент поглощения  $\alpha$  для тонкой пленки был вычислен на основе измеренного коэффициента экстинкции  $k$  с использованием следующей формулы:  $\alpha = 4\pi k/\lambda$ . Из анализа графика в рисунке 1 (в) можно сделать вывод, что с увеличением длины волны коэффициент поглощения уменьшается, достигая полной прозрачности пленки при значениях выше 480 нм.

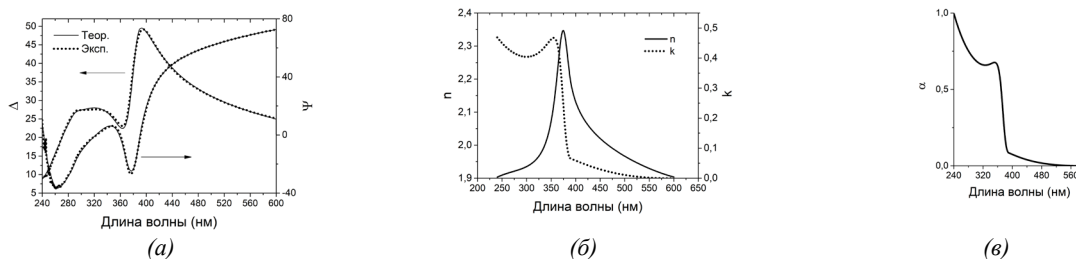


Рис. 1. Сравнение экспериментальных и расчетных эллипсометрических данных  $\Psi$  и  $\Delta$  (а), показатели преломления  $n$  и коэффициент экстинкции  $k$  (б) и зависимость коэффициента поглощения от длины волны света (в) пленки ZnO

### Список литературы

1. Yuqi Chen, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 423 (2018) 012170, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/423/1/012170>.
2. Borysiewicz, M.A. ZnO as a Functional Material, a Review. Crystals 9, (2019), 505. <https://doi.org/10.3390/cryst9100505>.
3. Y. Liang, F. Wang, X. Luo, Q. Li, T. Lin, I.T. Ferguson, Q. Yang, L. Wan, Z.C. Feng, Journal of Applied Spectroscopy, 86(2), (2019) 276–282, <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00812-6>.

У.Б. УЛЖАЕВ<sup>1</sup>, К.К. МЕХМОНОВ<sup>1</sup>, Ш.Р. УРИНОВ<sup>2</sup>, У.Б. ХАЛИЛОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Денауский институт предпринимательства и педагогики, Денау, Узбекистан

## ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КЛАСТЕРА НА АДсорбЦИЮ ВОДОРОДА НА УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКЕ

Наше исследование, проведенное с помощью молекулярно-динамического моделирования, показывает, что включение эндоэдральных атомов никеля может повысить способность углеродных нанотрубок накапливать водород.

U.B. ULJAYEV<sup>1</sup>, K.K. MEHMONOV<sup>1</sup>, SH.R. URINOV<sup>2</sup>, U.B. KHALILOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ion-Plasma and Laser Technology of Uzbekistan Academy of Science, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>Denau Institute of Entrepreneurship and Pedagogy, Uzbekistan, Denau, Uzbekistan

## THE INFLUENCE OF METAL CLUSTERS ON HYDROGEN ADSORPTION IN CARBON NANOTUBES FOR ENHANCED HYDROGEN STORAGE

Our molecular dynamics simulation study shows that the inclusion of endohedral nickel atoms can enhance the hydrogen storage capacity of carbon nanotubes.

Водородная энергетика представляет собой важнейший источник возобновляемой энергии, однако основное препятствие заключается в эффективном хранении водорода. Несмотря на заметные достижения в использовании углеродных нанотрубок (УНТ) для хранения водорода, их эффективность в этом отношении остается заметно ниже оптимальной[1]. В этом исследовании реактивная молекулярная динамика (МД) использовалась для изучения хранения водорода в однослойных углеродных нанотрубках (ОУНТ) с эндоэдральными атомами/кластером никеля.[2,3].

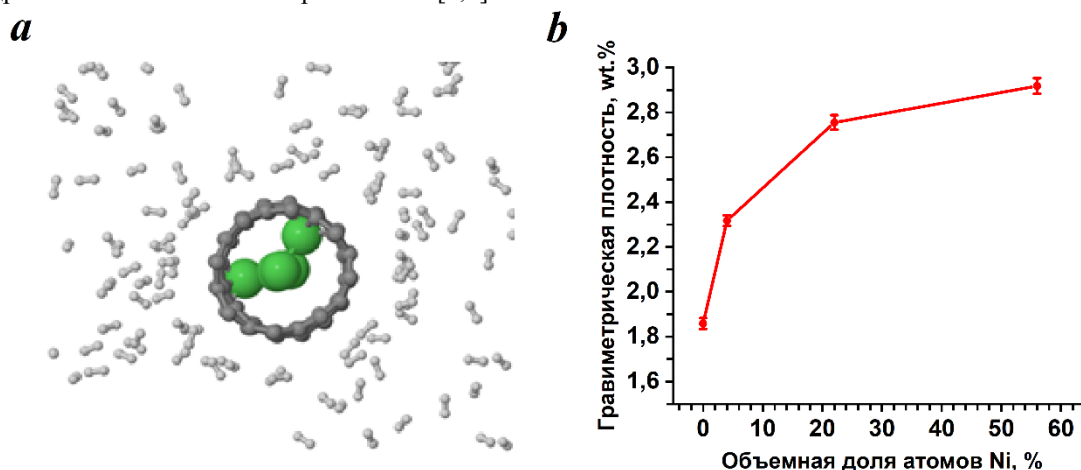


Рис. 1. а) Поперечное сечение Ni<sub>5</sub>@УНТ (объемная доля заполнения 22%) с окружающими молекулами H<sub>2</sub>, б) Средняя весовая плотность физсорбированных молекул H<sub>2</sub> зависит от объемной доли эндоэдральных атомов никеля.

Результаты показали, что внедрение атомов никеля внутрь ОУНТ изменяет парциальные заряды атомов в системе. Следовательно, увеличение объемной доли атомов никеля приводит к увеличению концентрации физсорбированных молекул водорода вокруг ОУНТ примерно в 1,6 раза [3]. Это исследование способствует пониманию на атомном уровне роли металлических нанокатализаторов в улучшении хранения водорода с использованием УНТ.

### Список литературы

1. C. Liu et al. Hydrogen Storage in Single-Walled Carbon Nanotubes at Room Temperature, Science Vol 286, 5 (1999).
2. U. Khalilov et al., How the Alignment of Adsorbed Ortho H Pairs Determines the Onset of Selective Carbon Nanotube Etching, Nanoscale 9, 1653 (2017).
3. U. Khalilov et al., Can endohedral transition metals enhance hydrogen storage in carbon nanotubes?, International Journal of Hydrogen Energy, 55, 604 (2024).

А.Н. УРОКОВ, Х.Э. АБДИЕВ, М.Б. ЮСУПЖАНОВА, Ё.С. ЭРГАШОВ,  
Д.А. ТАШМУХАМЕДОВА, Б.Е. УМИРЗАКОВ

*Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан*

## ВЛИЯНИЕ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ Ba<sup>+</sup> НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ ВТСП МАТЕРИАЛОВ

В работе впервые исследовалось влияние имплантации ионов Ba на состав и ширину запрещенной зоны  $E_g$ , число валентных электронов керамики  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$ .

A.N. UROKOV, X.E. ABDIEV, M.B. YUSUPJANOVA, Y.S. ERGASHEV,  
D.A. TASHMUKHAMEDOVA, B.E. UMIRZAKOV

*Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan*

## INFLUENCE OF IMPLANTATION OF Ba<sup>+</sup> IONS ON THE ELECTRONIC STRUCTURE OF HTS MATERIALS

In this work, for the first time, to study the effect of Ba ion implantation on the composition and band gap  $E_g$  and the number of valence electrons of  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$  ceramics.

В последние годы интенсивно ведутся исследования по созданию и изучению свойств новых видов высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов [1–3]. В работе [2] показано, что облучение гамма-квантами Co-60 керамических ВТСП материалов  $\text{Bi(Pb)}2223$  с различным содержанием кислорода приводит к немонотонной зависимости критической температуры  $T_c$  от дозы облучения при флюенсах меньше  $2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$ . При дозах облучения  $> 2 \cdot 10^{18} \text{cm}^{-2}$  характер зависимостей  $T_c$  и удельного сопротивления  $\rho$  не зависит от предварительной термообработки, что может указывать на единый механизм радиационных нарушений в материалах с избытком и недостатком кислорода.

В работе впервые с использованием методов оже-электронной спектроскопии, спектроскопии характеристических потерь энергии электронов, измерением энергетических зависимостей коэффициента вторичной электронной эмиссии  $\sigma$  исследовалось влияние имплантации ионов Ba на состав и ширину запрещенной зоны  $E_g$ , число валентных электронов керамики  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$ .

Установлено, что зависимости  $I(h\nu)$  имеют ступенчатый характер: сначала до определенного значения  $h\nu$  значение  $I$  не меняется, т.е. не происходит поглощения света, а затем резко уменьшается до нуля. В случае нелегированного ВТСП  $I$  не меняется до  $h\nu = 4 \text{ eV}$ . Можно полагать, что в этом интервале  $h\nu$  значение коэффициента отражения света  $R$  составляет  $\sim 0.32$ , а коэффициент прохождения  $T \sim 0.68$ , а коэффициент поглощения равен 0. В случае ВТСП имплантированного ионами  $\text{Ba}^+$  до  $h\nu = 0.4 \text{ eV}$  значение  $I$  практически не меняется, а значения коэффициентов составляет:  $R = 0.23$ ;  $T = 0.77$ ;  $K = 0$ . Показано, что  $E_g$  для нелегированной керамики составляет  $0.5 \text{ eV}$ , а ионно-легированной керамики –  $4.5 \text{ eV}$ . Значение ширины запрещенной зоны и среднее число валентных электронов  $n_{\text{cp}}$  исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Ширина запрещенной зоны и среднее число валентных электронов

Материал	$E_g, \text{ eV}$	$n_{\text{cp}}$	R	T	K
$\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$	0.5	4	0.32	0.68	0
$\text{Ba}^+ \rightarrow \text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$	4.5	3.5	0.23	0.77	0

В сверхпроводящем состоянии уровень Ферми нелегированного ВТСП располагается вблизи верхнего края заполненных состояний. Между заполненными и свободными состояниями имеется узкая щель с энергетической шириной  $0.4\text{--}0.5 \text{ eV}$ . Что касается ионно-легированных образцов  $\text{CuOY}_2\text{O}_3\text{BaO}$ , то вследствие увеличения концентрации окиси бария и возникновения свободных атомов металлов, их поверхности теряют сверхпроводящие свойства даже при температуре жидкого азота. При этом сверхпроводящие свойства образца в более глубоких слоях  $d \geq 50\text{--}60 \text{ \AA}$  полностью сохраняются. Электронная структура поверхности сверхпроводника после ионной имплантации становится характерной для тонких пленок окислов.

### Список литературы

1. В.А. Гуринович, Ф.П. Коршунов, В.К. Шешолко, Доклады БГУИР, 1, 69 (2005).
2. Y. Zhang, X. Xu, Physica C: Superconductivity and its applications, 595, 1354031 (2022).
3. Д.А. Ташмухамедова, А.Н. Уроков, Письма в ЖТФ, 2023, том 49, вып. 20. С. 23 – 26.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ОКСИДЕ МЕДИ, ОСАЖДЕННОМ ИЗ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Методом атомно-силовой микроскопии с проводящим зондом исследован эффект резистивного переключения в тонкой пленке  $\text{Cu}_x\text{O}$  состоящей из смеси фаз. В структуре  $\text{Cu}/\text{Cu}_x\text{O}/\text{Pt}$  установлен механизм образования проводящих филаментов под действием внешнего электрического поля. Приведены факторы, способные затруднить интерпретацию результатов.

L.Yu. FEDOROV, I.V. KARPOV

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

### STUDY OF RESISTIVE SWITCHING IN POLYCRYSTALLINE COPPER OXIDE DEPOSITED FROM LOW-PRESSURE ARC DISCHARGE PLASMA

The effect of resistive switching in a thin  $\text{Cu}_x\text{O}$  film consisting of a mixture of phases was studied using atomic force microscopy with a conducting probe. In the  $\text{Cu}/\text{Cu}_x\text{O}/\text{Pt}$  structure, a mechanism for the formation of conductive filaments under the influence of an external electric field has been established. Factors that may complicate the interpretation of the results are given.

Тонкие пленки оксидов переходных металлов ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{HfO}_2$  и др.) обладают эффектом резистивного переключения. Это делает возможным их применение в мемристорных устройствах хранения данных и нейроморфных вычислениях. Поликристаллические оксиды меди благодаря полупроводниковой природе и высокой диэлектрической проницаемости хорошо подходят на роль такого устройства [1].

Механизм резистивного переключения зависит от возможности образования и разрыва наноразмерных проводящих нитей между электродами и обеспечивающих два состояния оксида, контролируемых смещением напряжения. При установлении напряжения между электродами порядка +2 В (режим SET) оксид переходит в состояние низкого сопротивления (LowRes), которое может сохраняться после отключения формирующего электрического поля. Сброс установившегося в оксиде состояния (режим RESET) происходит при подаче противоположного значения напряжения (-2 В), тогда материал возвращается в исходное состояние высокого сопротивления (HiRes).

В подобных устройствах важной характеристикой стабильности их работы является окно сопротивлений между двумя состояниями, которое должно иметь порядок  $\sim 10^2$ - $10^4$  Ом и неперекрывающиеся диапазоны значений при температурных воздействиях и многочисленных циклах «перезаписи».

В настоящей работе нанокристаллическая пленка, представляющая собой смешанные фазы оксидов меди ( $\text{Cu}_x\text{O}$ ) была синтезирована осаждением из плазмы дугового разряда низкого давления работающей в аргон-кислородной атмосфере. Ее особенность – наличие большого количества структурных дефектов в виде кислородных вакансий. Именно они могут участвовать в образовании проводящих филаментов между электродами.

Исследования проводились на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 (завод «Протон», Россия). Сканирование проводили в режиме контактной атомно-силовой микроскопии (ЕAFM) с проводящими кантилеверами (покрытие Pt/Ir). Образцы представляли собой слоистую структуру: пленка Cu (~1 мкм) в качестве нижнего электрода, резистивный слой – поликристаллическая пленка смешанных фаз оксидов меди ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ ). В качестве верхнего электрода при снятии локальных вольт-амперных характеристик выступал кантилевер микроскопа. Площадь контактной площадки  $\sim 100$  нм<sup>2</sup>. Поле сканирования  $2 \times 2$  мкм, напряжение на нижний электрод до  $\pm 2$  В. Таким образом, было получено топографическое изображение поверхности и карта плотностей тока образца в двух состояниях сопротивления.

Вычисленная плотность тока образца в состоянии высокого сопротивления была небольшой и составила 0,74 нА/мкм<sup>2</sup>. Было видно, что максимумы плотности тока локализованы на границах зерен, где, по видимому, присутствует высокая концентрация структурных дефектов. При переключении образца в состояние низкого сопротивления картина распределения тока значительно изменялась. Появилось множество участков с высокой плотностью тока (более 100 на текущем масштабе), с суммарным значением 1420 нА/мкм<sup>2</sup>.

Стоит отметить, изменение состояния сопротивления не приводило к изменению шероховатости образца. Это свидетельствует о том, что механизм образования филаментов в рассмотренной структуре основан на формировании цепочек из вакансий кислорода, обеспечивающих перенос заряда, и не связан с возможной миграцией ионов Cu в пленке, способной изменить структуру поверхности.

При интерпретации результатов АСМ исследований следует учитывать, что картина распределения филаментов в образце может быть искажена вследствие локальности воздействия зонда. При измерениях ВАХ в макро режиме, т.е. когда резистивный слой ( $\text{Cu}_x\text{O}$ ) находится между двумя электродами электрическое поле более равномерно.

Работа выполнена в рамках госзадания FWES-2024-0026.

*Список литературы*

1. Kundale S.S., Patil A.P., Patil S.L. and others // Applied Materials Today. 2022. Vol. 27.P. 101460.

Ф. ХАЙДАРОВ<sup>1</sup>, Ф. САФАРОВ<sup>1</sup>, У. ХАЛИЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова, Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Университет Антверпена, Антверпен, Бельгия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАНОВОЙ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ НИКЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛЕНА

В настоящее время спрос на этилен, ключевой продукт химической промышленности, растет, и эффективное производство этилена из экономически доступного сырья становится все более важным. В этом исследовании, основанном на моделировании, изучается взаимодействие между частицами плазмы и поверхностью катализатора для получения этилена из недорогого метана с использованием энергоэффективного плазменного катализа.

F. KHAYDAROV<sup>1</sup>, F. SAFAROV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

## SIMULATION OF THE INTERACTION OF METHANE PLASMA WITH A NICKEL SURFACE FOR ETHYLENE PRODUCTION

The demand for ethylene, a key product in the chemical industry, is currently growing, and the efficient production of ethylene from economically accessible feedstock is becoming increasingly important. In this simulation-based study, the interaction between plasma particles and the catalyst surface is investigated to obtain ethylene from inexpensive methane using energy-efficient plasma catalysis.

Метан риформинг с использованием плазменного катализа, который является экологически чистым благодаря отсутствию парниковых газов, может стать одним из важных способов получения этилена в ближайшем будущем [1,2]. Однако механизмы взаимодействия поверхности катализатора с видами плазмы, важные для управления процессом, до сих пор полностью не поняты [3]. В этой работе было исследовано взаимодействие радикала  $\text{CH}_3$  с поверхностью никелевого катализатора  $\text{Ni}(111)$  и  $\text{Ni}(100)$  с использованием программного пакета LAMMPS на основе реактивной молекулярной динамики и потенциала ReaxFF, разработанного Zou и другими [4].

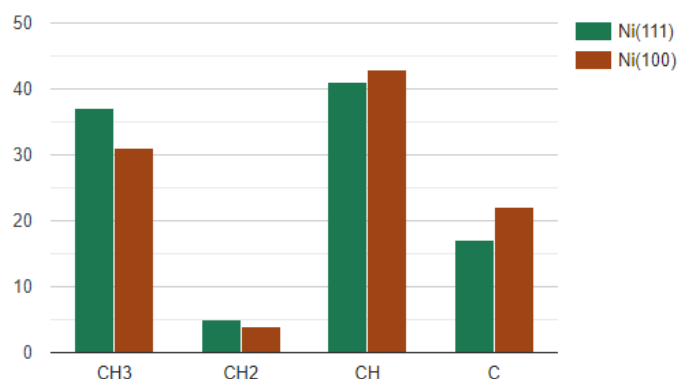


Рис. 1. Процентное распределение недиссоциированных и диссоциированных радикала  $\text{CH}_3$  на поверхностях катализаторов  $\text{Ni}(111)$  и  $\text{Ni}(100)$ .

Рис. 1 показывает, что диссоциация  $\text{CH}_3$  приводит к появлению других частиц, а именно частиц  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$  и  $\text{C}$ , на обеих поверхностях никеля. В дальнейшем эти образовавшиеся частицы соединяются двумя путями реакций: (1)  $\text{CH}_2 + \text{CH}_2$  или (2)  $\text{CH}_3 + \text{CH}$ , приводящими к образованию молекул этилена. Первый метод оказывается неэффективным из-за низкой скорости образования форм  $\text{CH}_2$ . И наоборот, образование частиц  $\text{CH}_3$  и  $\text{CH}$ , следовательно, способствует эффективному образованию молекул этилена (второй путь реакции) на обеих поверхностях никеля. Эти результаты могут послужить намеком для экспериментаторов в будущем.

### Список литературы

1. J. Feng and et al., *Advanced science*. Vol. 9, 2022, 34
2. . Zhang and et al., *J. Phys. Chem. C* 2013, 117E.
3. C. Neyts, *Plasma Chem Plasma Process*, 2015
4. C. Zou et al., *Acta Materialia* Vol 83,2015, 102



## ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА TiNiCu

Аморфно-кристаллические слоистые ленты из сплава TiNiCu с эффектом памяти формы получены с помощью технологии быстрой закалки из жидкого состояния с разной толщиной кристаллического слоя. Исследовано влияние толщины кристаллического слоя на свойства сплавов, в частности, на процесс структурообразования при кристаллизации.

D.A. KHACHATRIAN, A.V. SHELYAKOV, N.N. SITNIKOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## FEATURES OF CRYSTALLIZATION OF AMORPHONO-CRYSTALLINE TiNiCu ALLOY

Amorphous-crystalline layered TiNiCu alloy ribbons with shape memory effect were obtained with varying crystalline layer thickness using rapid quenching from liquid state. The effect of crystalline layer thickness on alloy properties, specifically the process of forming the structure of ribbons during crystallization, was analyzed.

В данной работе аморфно-кристаллические слоистые ленты толщиной 30-50 мкм из сплава квазибинарной системы TiNi-TiCu с содержанием Cu 25 ат.%, обладающего эффектом памяти формы, были получены с использованием технологии быстрой закалки из жидкого состояния при разной скорости охлаждения расплава. Исследование микроструктуры поперечного сечения образцов в сканирующем электронном микроскопе показало, что толщина кристаллического слоя варьируется от 6 до 13 мкм в зависимости от скорости охлаждения расплава.

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) исследовался характер кристаллизации образцов при непрерывном нагреве в калориметре. Было выявлено, что присутствие кристаллического слоя оказывает заметное влияние на процесс кристаллизации сплава - по сравнению с полностью аморфным сплавом TiNiCu [1] температура пика кристаллизации увеличивается, а интервал кристаллизации сужается на несколько градусов. Кроме того, увеличение толщины кристаллического слоя приводит к снижению этих параметров.

Влияние кристаллического слоя наиболее отчетливо проявляется на кривых ДСК в температурном интервале мартенситного превращения (МП) (рис. 1). После кристаллизации в образцах наблюдается раздвоение пиков выделения и поглощения тепла. Это обусловлено тем, что в ленте формируется структура, состоящая из двух кристаллических слоев: один - кристаллизованный аморфный слой в основном с субмикрорекристаллической структурой [1], а второй - рекристаллизованный кристаллический слой, который сохраняет исходную столбчатую структуру. Из-за различающегося фазового состава и разной морфологии, критические температуры МП в этих двух слоях несколько отличаются, что приводит к раздвоению пиков на кривых ДСК. При этом уменьшение толщины исходного кристаллического слоя приводит к смещению пиков навстречу друг другу, а также к выравниванию интенсивностей низкотемпературного и высокотемпературного пика, что особенно ярко видно на пиках выделения тепла.

Полученные данные свидетельствуют о том, что процесс структурообразования в сплаве TiNiCu с 25 ат.% Cu при кристаллизационном отжиге в значительной степени зависит от его исходного состояния после закалки, а именно, от наличия и толщины кристаллического слоя, а также от влияния образующейся границы раздела аморфного и кристаллического слоев. Это обстоятельство, безусловно, требует учитывать при использовании этих сплавов в качестве функциональных материалов с эффектом памяти формы.

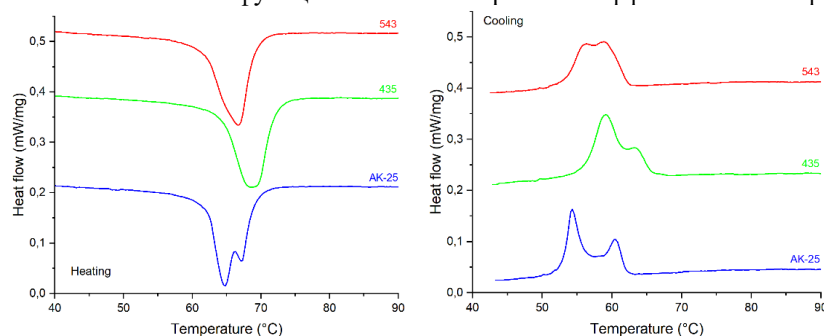


Рис. 1. ДСК-кривые образцов с разной толщиной кристаллического слоя: 543 – 7 мкм, 435 – 9 мкм, АК-25 – 12 мкм.

Работа выполнена за счет гранта РФФ (проект No 23-29-00779).

### Список литературы

1. Shelyakov A., Sitnikov N., Zaletova I., and others Study of Structure and Phase Transformations in Rejuvenated Rapidly Quenched TiNiCu Alloys // Metals - 2023. V. 13(7). – P. 1175.

А.А. ХОМИЧ<sup>1,2</sup>, С.В. РОГОЖКИН<sup>1,2</sup>, А.А. НИКИТИН<sup>1,2</sup>, А.А. БОГАЧЕВ<sup>1,2</sup>, А.А. ЛУКЪЯНЧУК<sup>1,2</sup>,  
О.А. РАЗНИЦЫН<sup>1,2</sup>, А.С. ШУТОВ<sup>1,2</sup>, А.В. КЛАУЗ<sup>1,2</sup>, Н.А. ИСКАНДАРОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## УЛЬТРАМИКРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ НАНОСТРУКТУРЫ РОССИЙСКИХ ДУО СТАЛЕЙ ПОСЛЕ ИМИТАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

В данной работе представлено комплексное исследование методами просвечивающей электронной микроскопии и атомно-зондовой томографии стабильности микро и наноструктуры российских дисперсно-упрочненных оксидами сталей ЭП-823 ДУО и ЭП-450 ДУО после имитационных воздействий ионами Fe при температурах от 350°C до 500°C и в диапазоне доз от 30 до 100 сна.

A.A.KHOMICH<sup>1,2</sup>, S.V.ROGOZHKIN<sup>1,2</sup>, A.A. NIKITIN<sup>1,2</sup>, A.A.BOGACHEV<sup>1,2</sup>,  
A.A. LUK'YANCHUK<sup>1,2</sup>, O.A. RAZNICYN<sup>1,2</sup>, A.S. SHUTOV<sup>1,2</sup>, A.V. KLAUZ<sup>1,2</sup>,  
N.A. ISKANDAROV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## STUDY OF THE RADIATION HARDENING MECHANISMS OF HEAT-RESISTANT OXIDE DISPERSION STRENGTHENED STEELS IN ACCELERATED TESTS USING ION IRRADIATION AND ULTRAMICROSCOPIC ANALYSIS

This work presents a comprehensive study of micro and nanostructure stability of Russian oxide dispersion-strengthened steels EP-823 ODS and EP-450 ODS using transmission electron microscopy and atom probe tomography after Fe ion irradiation at temperatures from 350°C to 500°C and in the dose range from 30 to 100 dpa.

Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) стали (ODS steels - oxide dispersion strengthened steels) обладают заметно более высокой жаропрочностью, чем традиционные ферритно-мартенситные стали за счет значительного числа равномерно распределенных оксидов. Такие материалы разрабатываются для ряда ядерных приложений: первой стенки будущих термоядерных реакторов, материалов оболочек топливных элементов в реакторах на быстрых нейтронах и для применения в других реакторных установках IV поколения [1-2]. Эти материалы могут выдерживать температуры до 700 °С, и ожидается их устойчивость к радиационному распуханию до 200 сна [3]. Механические свойства ДУО сталей существенно зависят от характеристик наноструктуры: размера и пространственного распределения дисперсных включений. В свою очередь выбор легирующих добавок и режимов термомеханической обработки оказывают прямое влияние на данные характеристики. Количественный анализ оксидных включений в ДУО сталях требует применения нескольких дополняющих друг друга методов микроскопического анализа, таких как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и атомно-зондовая томография (АЗТ).

Поскольку повышенные эксплуатационные свойства ДУО сталей существенно зависят от оксидных нановключений (частиц и кластеров), равномерно распределенных в матрице, изучению стабильности наноструктуры ДУО сталей в том числе и под облучением уделяется пристальное внимание [3, 4].

Целью настоящей работы является систематическое комплексное исследование радиационно-индуцированных изменений Российских ДУО сталей ЭП-450 ДУО и ЭП-823 ДУО в области низкотемпературного радиационного охрупчивания от 350°C до 500°C в диапазоне доз от 30 до 100 сна. Сталь ЭП450 ДУО в исходном состоянии имеет большее количество оксидных частиц и кластеров меньшего размера. После облучения до 30 сна в стали ЭП823 ДУО наблюдается формирование большого числа радиационно-индуцированных кластеров Si-Ni-Mn. В стали ЭП450 ДУО подобного эффекта нет. Произведенные измерения нанотвердости, показывают, что основные отличия поведения сталей происходят при высоких температурах облучения и доз до 60 сна. При дозе 100 сна обе стали демонстрируют тенденцию к разупрочнению.

### Список литературы

1. Carlan Y., Bechade J.-L., Dubuisson P. // J. Nucl. Mater. 2009. V. 386–388. P. 430.
2. Jeong Y.H., Kim W.J., Kim D.J. // Proc. Eng. 2014. V. 86. P. 1.
3. Wharry J.P., Swenson M.J., Yano K.H. // J. Nucl. Mater. 2017. V. 486. P. 11.
4. Liu X., Miao Y., Wu Y., Maloy S.A., Stubbins J.F. // Scripta Mater. 2017. V. 138. P. 57.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАННИХ СТАДИЙ РОСТА ОРГАНИЧЕСКИХ НАНОКРИСТАЛЛОВ: ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПЕРИЛЕНА И НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ

Понимание стадии предзародышеобразования кластера имеет решающее значение для выяснения стадии зарождения роста органических кристаллов. Используя моделирование реактивной молекулярной динамики, мы исследовали образование кластеров до нуклеации для трех типов молекул перилена. Это исследование помогает лучше понять ранние этапы синтеза органических нанокристаллов перилена.

D. HUSANOVA<sup>1</sup>, K. MEHMONOV<sup>1</sup>, J. OCHILOV<sup>3</sup>, S. MIRZAEV<sup>1</sup>, U. KHALILOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup> University of Antwerp, Antwerp, Belgium

<sup>3</sup> Denau Institute of Entrepreneurship and Pedagogy, Denau, Uzbekistan

## SIMULATION OF EARLY STAGES OF GROWTH OF ORGANIC NANOCRYSTALS: INFLUENCE OF PERYLENE DERIVATIVES AND NICKEL NANOPARTICLES

Comprehending the pre-nucleation stage of cluster formation is pivotal in elucidating the nucleation stage of organic crystal growth. Employing reactive molecular dynamics simulations, we investigated pre-nucleation cluster formation for three variants of perylene molecules. This research contributes to a deeper understanding of the initial phases in the synthesis of organic perylene nanocrystals.

Понимание стадии предзародышеобразования кластера имеет решающее значение для выяснения фазы зародышеобразования при росте органических кристаллов. В данном исследовании исследуется образование зародышей периленовых кластеров в вакууме [1]. Мы заметили, что молекулы перилена образуют кластеры за счет таких взаимодействий, как  $\pi$ - $\pi$ -укладка и силы Ван-дер-Ваальса [2]. Кроме того, присутствие кислорода в молекулах ускоряет кластеризацию за счет водородных связей. Полученные кластеры не соответствуют типичным кристаллическим структурам перилена, что указывает на нестандартные методы образования органических кристаллов (рис. 1a) [3]. Более того, введение наночастиц катализатора в среду на основе перилена существенно задерживает образование кластеров. В частности, процесс кластеризации заметно более задерживается для наночастиц Ni по сравнению с наночастицами NiO (рис. 1b).

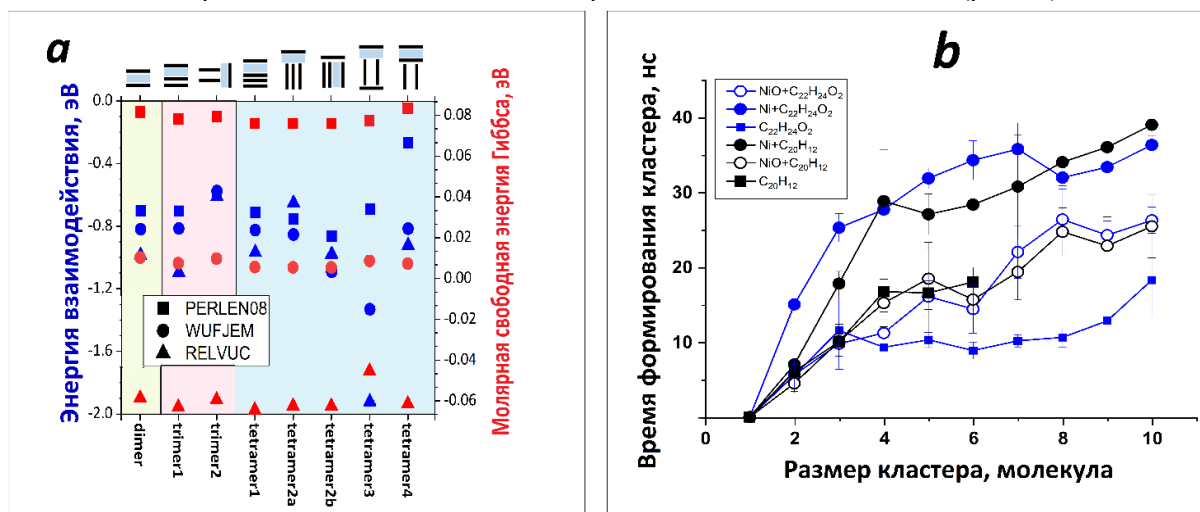


Рис. 1. (а) Энергия взаимодействия мономера (молекулы) с кластером, а также молярная свободная энергия Гиббса образующегося периленового кластера. (б) Связь между временем формирования кластера и размером кластера.

### Список литературы

1. D. Gebauer et al., Chemical Society Reviews 43 (2014) 2348.
2. U. Khalilov, et al. Uzbek Journal of Physics 23 (2021) 7-11.
3. D. Husanova, J. Ochilov, U. Khalilov Chemical Physics 579 (2024) 112191.

Д.М. ЧЕРНЫШОВ, Д.А. АКСЁНОВ  
*Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия*

## **ДВОЙНЫЕ ФТОРИДЫ НАТРИЯ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ: СТРУКТУРА, СТАБИЛЬНОСТЬ И ПРОВОДИМОСТЬ МЕТОДОМ ФУНКЦИОНАЛА ПЛОТНОСТИ**

Проведен первопринципный расчет структуры редкоземельных фторидов натрия  $\text{-NaREF}_4$  ( $\text{RE} = \text{Y, La, Ce, Nd}$ ), получена электронная структура данных соединений, рассчитано термодинамическое окно стабильности. Для соединений, для которых  $\text{RE} = \text{Y, La}$ , вычислен барьер миграции Na вдоль одного из кристаллографических направлений.

D.M. CHERNYSHOV, D.A. AKSYONOV  
*Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia*

## **DOUBLE FLUORIDES OF SODIUM AND RARE EARTH ELEMENTS AS SOLID ELECTROLYTES: STRUCTURE, STABILITY AND CONDUCTIVITY FUNCTIONAL DENSITY METHOD**

A first-principles calculation of the structure of rare earth sodium fluorides  $\text{-NaREF}_4$  ( $\text{RE} = \text{Y, La, Ce, Nd}$ ) was carried out, the electronic structure of these compounds was obtained, and the thermodynamic stability window was calculated. For compounds for which  $\text{RE} = \text{Y, La}$ , the barrier to Na migration along one of the crystallographic directions is calculated.

Аккумуляторы являются неотъемлемой частью нашей современной жизни. Обеспечивая независимое питание и хранение энергии, они находят широкое применение в различных областях энергетики и электротехники.

Перспективной технологией, позволяющей значительно повысить энергоёмкость аккумулятора, являются твердотельные аккумуляторы, с твердым электролитом и металлическим литием/натрием в качестве анода [1]. Одним из ключевых аспектов в разработке твердотельных аккумуляторов является обеспечение стабильности интерфейсов электролит/электрод, особенно на анодной стороне, где электролит контактирует с щелочным металлом. Не менее важным свойством является высокая ионпроводимость электролита, что обеспечит быстроту протекания электрохимических реакций, а также высокое электрическое сопротивление, для предотвращения восстановления лития/натрия в объеме электролита.

В данной работе исследуются соединения  $\text{NaREF}_4$  ( $\text{RE} = \text{Y, La, Ce, Nd}$ ) в качестве потенциальных твердых электролитов для натрий-ионных аккумуляторов. Эти соединения обладают структурой гагаринитов с пространственной группой P-6 и характеризуются ионным разупорядочением [2], что создает трудности для их моделирования. В данной работе проведено исследование структуры данных соединений с использованием теории функционала плотности. Была проведена оптимизация различных суперячеек и определены основные направления ионного разупорядочения. Также была получена электронная структура и изучен характер химических связей. Анализ моделирования указывает на то, что данные соединения являются изоляторами с большой шириной запрещенной зоны  $\sim 6$  eV.

Для оценки стабильности электролита были рассчитаны энергии электрохимических реакций в зависимости от химического потенциала Na на аноде и катоде. После чего было вычислено термодинамическое окно стабильности. Наиболее стабильными соединениями на анодной стороне оказались соединения  $\text{NaLaF}_4$  и  $\text{NaYF}_4$ .

Для оценки ионной проводимости, для наиболее стабильных соединений ( $\text{RE} = \text{Y, La}$ ), были вычислены барьеры миграции Na в одном из кристаллографических направлений с помощью метода упругой ленты. Так, высота барьера миграции Na для  $\text{NaLaF}_4$  составляет около 0.28 eV, в то время как для  $\text{NaYF}_4$  – 0.45 eV.

Исходя из полученных результатов, можно заключить, что соединения  $\text{NaYF}_4$  и  $\text{NaLaF}_4$  обладают большим сопротивлением, хорошей стабильностью и потенциально высокой ионной проводимостью, что делает их хорошими кандидатами в качестве твердых электролитов. Ввиду более низкого барьера миграции в качестве твердого электролита лучше использовать соединение  $\text{NaLaF}_4$ , в то время как соединение  $\text{NaYF}_4$  можно использовать в качестве тонкого буферного слоя между электролитом и анодом, для обеспечения стабильности интерфейса.

Работа выполнена при поддержке Сколковского Института Науки и Технологий

### *Список литературы*

1. Zaman, Wahid, and Kelsey B. Hatzell. Processing and manufacturing of next generation lithium-based all solid-state batteries // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. V. 26. No. 4. P. 101003.
2. Shi, Rui and Brites, Carlos D. S. and Carlos, Luís D. Hexagonal-phase  $\text{NaREF}_4$  upconversion nanocrystals: the matter of crystal structure // *Nanoscale*. 2021. V. 13 P. 19771-19782.

А.Д. ЧЕРТОВА, И.О. ВАХРУШЕВА, Ю.Ю. КАПЛАНСКИЙ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ  
*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

## **СРАВНЕНИЕ ПОКРЫТИЙ Hf-Mo-Si-B, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ В РЕЖИМАХ DCMS И HIPIMS**

Покрyтия Hf-Mo-Si-B были получены методами магнетронного распыления на постоянном токе (DCMS) и высокомошного импульсного магнетронного распыления (HIPIMS) на подложках из тугоплавких металлов, оксида алюминия и кремния. Исследовано влияние режима осаждения и материала подложки на структуру и свойства покрyтий. Результаты показали, что все покрyтия обладают плотной бездефектной структурой и близкими значениями твердости 12-13 ГПа, модуля упругости 180-190 ГПа и упругого восстановления 39-42%. Переход от режима DCMS к HIPIMS способствовал повышению стойкости к окислению при 1100-1500°C за счет высокой адгезионной прочности и формирования более плотной структуры.

A.D. CHERTOVA, I.O. VAKHRUSHEVA, YU.YU. KAPLANSKY,  
PH.V. KIRYUKHANTSEV-KORNEEV  
*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia*

## **COMPARISON OF Hf-Mo-Si-B COATINGS DEPOSITED BY DCMS AND HIPIMS METHODS**

Hf-Mo-Si-B coatings were produced using direct current magnetron sputtering (DCMS) and high-power impulse magnetron sputtering (HIPIMS) method on substrates made of refractory metals, aluminum oxide and silicon. The influence of the deposition mode and substrate material on the structure and properties of coatings was studied. The results showed that all coatings have a dense, defect-free structure and similar values of hardness 12-13 GPa, elastic modulus 180-190 GPa and elastic recovery 39-42%. The transition from the DCMS to HIPIMS mode contributed to an increase in oxidation resistance at 1100-1500°C due to high adhesive strength and the formation of a more dense structure.

Создание новых образцов современной техники в условиях, когда потенциал консолидированных материалов достигнут, невозможно без использования модификации поверхности и разработки функциональных покрyтий. В настоящее время значительное внимание уделяется исследованиям жаростойких покрyтий для защиты ответственных изделий, подверженных воздействию высоких температур и агрессивных газовых сред, а также различным видам износа. Целью данной работы являлось получение покрyтий методами магнетронного напыления на постоянном токе (DCMS) и высокомошного импульсного магнетронного напыления (HIPIMS), исследование влияния материала подложки и режима осаждения на структуру, адгезионную прочность, механические характеристики и стойкость к высокотемпературному окислению полученных покрyтий.

Покрyтия из мишени HfSi<sub>2</sub>-MoSi<sub>2</sub>-HfB<sub>2</sub> были получены методами DCMS и HIPIMS с использованием блоков питания Pinnacle+ Advanced Energy и TruPlasma 4002 Trumpf. Средняя мощность при реализации DCMS и HIPIMS составляла 1 кВт. Параметры HIPIMS были следующие: пиковый ток 50 А, пиковая мощность 50 кВт, длительность импульсов 50 мкс, частота 1000 Гц. Металлические и неметаллические подложки подвергались ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте в течение 5 мин и ионной очистке в течение 20 мин. Время осаждения покрyтий составляло 40 мин. Структуру и состав покрyтий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной спектроскопии, оптической эмиссионной спектроскопии тлеющего разряда и рентгенофазового анализа. Адгезионная прочность, трещиностойкость и механические свойства покрyтий измерялись методами скратч-тестирования, микро- и наноиндентирования, соответственно. Стойкость покрyтий к окислению оценивалась при температурах 1100, 1300 и 1500°C. После отжига покрyтия были исследованы перечисленными методами.

В исходном состоянии покрyтия DCMS и HIPIMS являлись рентгеноаморфными и характеризовались однородной структурой с равномерным распределением элементов по толщине. Результаты наноиндентирования показали, что все покрyтия имели близкие механические свойства: твердость 12-13 ГПа, модуль упругости 180-190 ГПа и упругое восстановление 39-42%. Переход от метода DCMS к HIPIMS привел к росту адгезионной прочности и стойкости к циклическим ударным воздействиям в 4 раза. Все покрyтия обладают высокой стойкостью к окислению при температурах 1100 и 1300°C. Защитные свойства покрyтий связаны с образованием поверхностной плёнки, состоящей из нанокристаллитов фаз t-HfSiO<sub>4</sub> и m-HfO<sub>2</sub>, расположенных в оксидном слое на основе SiO<sub>2</sub>. Переход от режима DCMS к HIPIMS привел к уменьшению дефектности и снижению толщины поверхностного оксидного слоя в 3-5 раз при температурах 1100 и 1300°C. Покрyтие, полученное в режиме HIPIMS, показало лучшую термическую стабильность и успешно сопротивлялось окислению при температуре 1500°C.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-49-00141).

Ф.И. ЧУДАРИН, А.Д. ЧЕРТОВА, Е.А. ЛЕВАШОВ, Ф.В. КИРЮХАНЦЕВ-КОРНЕЕВ  
*Университет науки и технологий МИСИС, Москва, Россия*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕГМЕНТОВ $\text{LaB}_6$ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ ГЕТЕРОФАЗНОЙ МИШЕНИ $\text{MoSi}_2\text{-MoB-ZrB}_2$

Отработана технология легирования жаростойких покрытий лантаном за счёт использования при магнетронном распылении мишени  $95\%(90\%\text{MoSi}_2+10\%\text{MoB})+5\%\text{ZrB}_2$  сегментами  $\text{LaB}_6$ . Определено изменение ВАХ при использовании дополнительных сегментов. Обнаружено, что применение  $\text{LaB}_6$  приводит к снижению напряжения зажигания тлеющего разряда. Методом магнетронного распыления получены покрытия  $\text{Mo-Zr-Si-B}$  и  $\text{Mo-La-Zr-Si-B}$ . Сравнительным распределением элементов по толщине, низкой шероховатостью и малодефектной структурой. Использование сегментов  $\text{LaB}_6$  в ходе осаждения приводит к подавлению столбчатого роста зёрен, аморфизации покрытий и повышению жаростойкости в условиях отжига при  $1500^\circ\text{C}$  на воздухе.

F.I. CHUDARIN, A.D. CHERTOVA, E.A. LEVASHOV, PH.V. KIRUHANTSEV-KORNEEV  
*University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia*

## THE USE OF $\text{LaB}_6$ SEGMENTS IN MAGNETRON SPUTTERING OF HETEROPHASE $\text{MoSi}_2\text{-MoB-ZrB}_2$ TARGET

The technology of doping the oxidation-resistant coatings with lanthanum has been developed by using of  $95\%(90\%\text{MoSi}_2+10\%\text{MoB})+5\%\text{ZrB}_2$  target with  $\text{LaB}_6$  segments for magnetron sputtering. A change in the CVC was determined when using additional segments. It was found that the use of  $\text{LaB}_6$  leads to a decrease in the breakdown voltage of the glow discharge.  $\text{Mo-Zr-Si-B}$  and  $\text{Mo-La-Zr-Si-B}$  coatings with uniform distribution of elements through thickness, low roughness and non-defect structure were obtained by magnetron sputtering. The use of  $\text{LaB}_6$  segments during deposition leads to suppression of columnar grain growth, amorphization of coatings and increased oxidation resistance under annealing conditions at  $1500^\circ\text{C}$  in air.

Жаростойкая керамика на основе  $\text{MoSi}_2$  считается перспективной для изготовления узлов и агрегатов, работающих при температурах  $1300\text{-}1500^\circ\text{C}$  [1]. Введение бора позволяет снизить растрескивание и за счёт эффекта самозалечивания повысить жаростойкость до уровня  $1600^\circ\text{C}$  [2]. Добавление Zr позволяет в 2 раза снизить убыль массы в ходе отжига длительностью 30 мин при  $1300\text{-}1500^\circ\text{C}$  [3]. Введение La позволяет уменьшить количество пор и повысить вязкость оксидных слоёв [4]. С целью экономии дорогостоящих легирующих добавок РЗМ рационально применять жаростойкие покрытия, вводя их только в поверхностный слой изделия. Наиболее эффективным для этих целей является метод магнетронного напыления, позволяющий сохранить точную геометрию изделий сложной формы. Целью работы являлось изготовление и использование сегментов  $\text{LaB}_6$  при распылении мозаичной мишени  $95\%(90\%\text{MoSi}_2+10\%\text{MoB})+5\%\text{ZrB}_2+\text{LaB}_6$ , получение методом магнетронного напыления и комплексное исследование структуры и свойств жаростойких покрытий  $\text{Mo-Zr-Si-B}$  и  $\text{Mo-La-Zr-Si-B}$ .

Для изготовления сегментов применялся порошок  $\text{LaB}_6$  ТУ 6-09-03-8-75. Прессование проводилось в стальной прессформе  $\varnothing 10$  мм при давлении 800 МПа, спекание проходило в плазме тлеющего разряда с использованием установки для нанесения покрытий. Осаждение покрытий осуществлялось в установке на базе откачивающей системы типа УВН-2М с использованием блока питания Pinnacle+AE при мощности 1 кВт. В качестве рабочего газа применялся Ar (99.9995%), давление в камере поддерживалось на уровне 0.2 Па при расходе 25 мл/мин. Покрытия наносились на модельные подложки из кремния, стали и оксида алюминия. Подготовка подложек включала в себя ультразвуковую очистку и травление ионами  $\text{Ag}^+$ .

Результаты показали, что высокие эмиссионные свойства  $\text{LaB}_6$  способствовали снижению напряжения зажигания тлеющего разряда при минимальной подаче рабочего газа в разрядный промежуток на  $\sim 100$  В, а также снижению на 20% минимального расхода рабочего газа, при котором возможен пробой. Для мишени минимальное напряжение зажигания при высоком расходе рабочего газа было стабильно и находилось на уровне 260-270 В, а для мишени с установленными на неё сегментами – 230-240 В. Использование сегментов  $\text{LaB}_6$  при осаждении покрытий способствует подавлению столбчатого роста зёрен  $\text{h-MoSi}_2$  и аморфизации их структуры. Все элементы равномерно распределены по толщине покрытий, содержание лантана в легированных покрытиях составляет 5 ат. %. Введение La повышает адгезионную прочность и снижает склонность к трещинообразованию при повышенных температурах. На поверхности покрытий после отжига обнаружены области, богатые оксидами и силикатами лантана. В ходе отжига при  $1500^\circ\text{C}$  толщины неокисленных слоёв покрытий  $\text{Mo-Zr-Si-B}$  и  $\text{Mo-La-Zr-Si-B}$  составили 5.5 и 6.6 мкм, соответственно при одинаковой толщине исходных покрытий 6.6 мкм. Таким образом, использование сегментов  $\text{LaB}_6$  при напылении покрытий привело к повышению жаростойкости покрытий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-49-00141).

### *Список литературы*

1. Mitra R. // Int. Mater. Rev., 2006. Vol. 51, P. 13-64.
2. Schneibel J. H., Tortorelli P. F., Ritchie R. O. et. al. // Metall. Mater. Trans. A. 2005. Vol. 36, P. 525–531.
3. Burk S., Gorr B., Trindade V. B., et. al. // Oxid. Met. 2009. Vol. 73, P. 163–181.
4. Majumdar S., Burk S., Schliephake D. et. al. // Oxid. Met. 2013. Vol. 80, P. 219–230.

Й. ШМАЙСНЕР<sup>1,2</sup>, А.Н. ТЮЛЮСОВ<sup>1,2</sup>, Н.О. ЕЛЮТИН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ККТЭФ НИИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## **ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРАЖЕННОГО ПУЧКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДИФРАКЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ В ГЕОМЕТРИЯХ ЛАУЭ И БРЭГГА В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОГО ПРОПУСКАНИЯ**

Рассмотрено пространственное распределение интенсивности отраженного пучка тепловых нейтронов волнового пакета ограниченной апертуры в случае динамической дифракции для кристаллических ориентаций по Лауэ и Брэггу. В работе учитывалось влияние на интенсивность дифрагированного пучка особого интерференционного эффекта – аномального пропускания нейтронов.

J. SCHMEISSNER, A.N. TYULYUSOV, N.O. ELYUTIN

<sup>1</sup>NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## **SPATIAL DISTRIBUTION OF THE REFLECTED BEAM INTENSITY IN CASE OF THE THERMAL NEUTRONS DYNAMIC DIFFRACTION IN LAUE AND BRAGG GEOMETRIES UNDER THE ANOMALOUS TRANSMISSION CONDITIONS**

The spatial distribution of the reflected beam intensity for the thermal neutrons wave packet of the specific aperture in the case of the dynamic diffraction in the Laue and Bragg crystallographic planes orientations is being considered. The work took into account the influence on the diffracted beam intensity of a special interference effect - neutrons anomalous transmission.

Используемые во многих нейтронно-дифракционных экспериментах апертурные системы для коллимации пучка или сканирования поверхности объекта исследования требуют рассмотрения эффектов динамического рассеяния пространственно-модулированной волны на периодической структуре кристалла. Уравнения Такаги-Топена [1] для задачи рентгеновского рассеяния на слабдеформированных кристаллах или пространственно-ограниченных волн позволяют провести обобщения их решения на случай нейтронной дифракции. Данная концепция, называемая методом экстинкционных волн, была применена Бушуевым и Тюлюсовым в работе [2]. Особенностью данного подхода является решение без использования плосковолнового приближения и перехода к решению блоховской волны.

На основе решений указанных уравнений с введенным методом экстинкционных волн было получено расчетное пространственное распределение интенсивности отраженного ограниченного пучка в случае дифракции нейтронов в геометриях Брэгга и Лауэ на совершенном кристалле InSb (111), обладающим резонансным поглощением в области энергий тепловых нейтронов.

### *Список литературы*

1. S. Takagi, Acta Crystallogr. **15**, 1311 (1962).
2. А. Бушуев, А. Н. Тюлюсов, В сб.: Тез. четвертой нац. конф. по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов для исследования материалов (Москва, 1999), с. 255.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В ЭРОЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ

Представлены результаты исследования методом АСМ-микроскопии состава, структуры и морфологии синтезированных наночастиц никеля в эрозионной лазерной плазме в дистиллированной воде. Показано, что профили размерных распределений наночастиц смещаются в сторону больших их размеров с ростом плотности мощности лазерного излучения.

P.I. SHUPAN, S.D. LESHCHYK

Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus

## CHARACTERISTICS OF NICKEL NANOPARTICLES SYNTHESIS IN EROSION LASER PLASMA IN DISTILLED WATER

The results of an AFM microscopy study of the composition, structure and morphology of synthesized nickel nanoparticles in erosive laser plasma in distilled water are presented. It has been shown that the profiles of the size distributions of nanoparticles shift towards larger sizes with increasing laser radiation power density.

Уникальность свойств наноматериалов стимулировало разработку методов их получения и широкого практического применения [1-2]. Одним из методов получения наночастиц, использующим плазменное состояние вещества, является их синтез в эрозионной лазерной плазме, получаемой при импульсной лазерной абляции твердофазных материалов в жидкостях [3-4]. Исследуя спектральный состав излучения эрозионной лазерной плазмы можно контролировать и управлять процессом лазерной абляции, а также определять элементный состав вещества [5-7].

Экспериментальная установка описана в [3-4, 6-7]. Исследования размерных распределений, полученных наночастиц, проводилось на атомно-силовом микроскопе NT-206. На рис. 1 приведены фрагменты 3D АСМ-изображений наночастиц никеля, синтезированных при использовании лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Анализ АСМ-изображений показывает, что в эрозионной плазме синтезируются наночастицы как

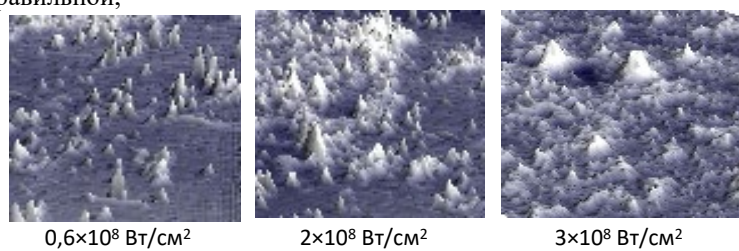


Рис. 1. Боковые 3D АСМ-изображения наночастиц никеля.

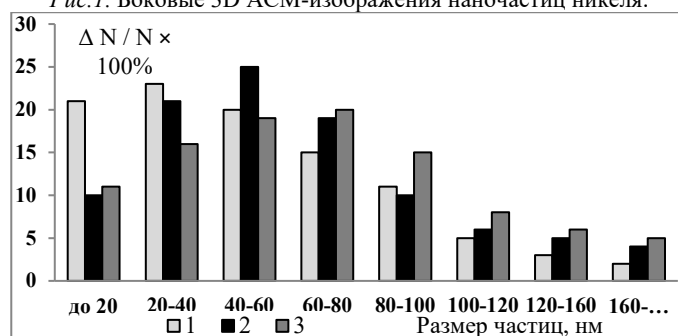


Рис. 2. Гистограммы размерных распределений наночастиц никеля. 10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> (1), 2×10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup> (2) и 5×10<sup>9</sup> Вт/см<sup>2</sup> (3)

как и неправильной формы. Наблюдаются пирамидальные и конусообразные наночастицы. Видно, что при увеличении плотности мощности лазерного излучения в диапазоне 0,6×10<sup>8</sup> - 3×10<sup>8</sup> Вт/см<sup>2</sup>, размер синтезированных наночастиц и их количество возрастают. Принципиальных изменений морфологии синтезированных наночастиц при изменении значения энергии лазерного излучения не выявлено.

На рис. 2 приведены гистограммы размерных распределений наночастиц, синтезированных в эрозионной лазерной плазме при абляции никеля в воде лазерными импульсами с длиной волны 1064 нм в зависимости от плотности мощности излучения. Видно, что максимум гистограмм размерных распределений наночастиц смещается в область больших их размеров с ростом плотности мощности лазерного излучения. Подобное наблюдается и при использовании второй (532 нм) и третьей (335 нм) гармоники лазерного излучения.

### Список литературы

1. Гончарова Д.А., Лапин И.Н., Савельев Е.С., Светличный В.А. // Известия ВУЗов. Физика. 2017. Т. 60, № 7. С. 99-106.
2. Макаров Г.Н. // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 7. С. 673-718.
3. Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Сергиенко И.Г., Серенко М.Ю. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2014. Т. 14, № 2. С. 84-87.
4. Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Ю.К. Калугин // Вестник Брестского гос.техн. универ. Сер.: Машиностр. 2014. № 4. С. 6-10.
5. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И. и другие // Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 5. С. 724-730.
6. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. // Журнал прикладной спектроскоп..2018. Т. 85, №2. С.285-292.
7. Зноско К.Ф. // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Мат. фіз. інфарм., выліч. тэхн. і кір. 2020. Т. 10, № 2. С. 103-115.



## ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА $\alpha 2$ -Ti3Al

Проведено одновременное исследование электросопротивления и теплового расширения интерметаллида  $\alpha 2$ -Ti3Al и показана корреляция эти параметров.

R.M. EMIROV, M.E. ISKHAQOV, M.KH. RABADANOV, D.K. PALCHAYEV, ZH.KH. MURLIEVA

Dagestan State University, Makhachkala, Russia

## ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND THERMAL EXPANSION OF THE INTERMETALLIC $\alpha 2$ -Ti3Al

A simultaneous study of electrical resistance and thermal expansion of the  $\alpha 2$ -Ti3Al intermetallic compound was carried out and the correlation between these parameters was shown.

Существует класс интерметаллидов, которые демонстрируют неметаллические свойства. Такое редкое «неметаллическое поведение» проявляют соединения, которые образованы металлами разных групп таблицы Д.И. Менделеева – переходные металлы с металлами или металлоидами из разных блоков. Когда взаимодействуют d- орбитали металла с s- p- орбиталями элемента из p-блока, в зонной структуре данного соединения появляется энергетическая щель и уровень Ферми переходит в запрещенную зону при определенной концентрации валентных электронов. Это приводит к проявлению неметаллических свойств [1].

На рисунке 1 приведены результаты исследования температурных зависимостей электросопротивления и изменения длины, а также температурных коэффициентов электросопротивления и линейного расширения, отнесенного к температуре, для интерметаллида  $\alpha 2$ -Ti3Al.

Этот интерметаллид демонстрирует наличие гистерезиса, обусловленный его закалкой при получении. Данный гистерезис можно объяснить сохранением неупорядоченности расположения атомов в системе, свойственной сплавам данных элементов, при высоких температурах. Исследования температурных зависимостей электросопротивления и теплового расширения, проведенные одновременно, показывают, что при нагревании в образцах происходят структурные изменения.

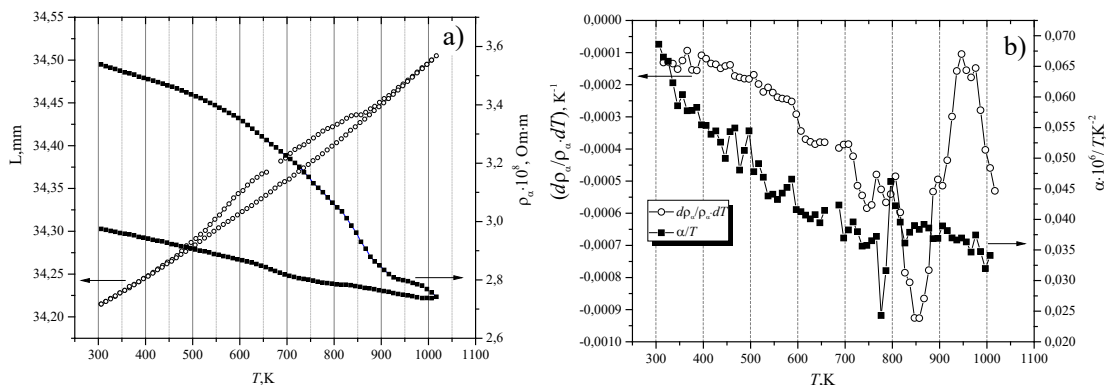


Рис. 1. Температурные зависимости: электросопротивления и изменения длины при нагреве (верхний участок) и охлаждении – а); температурных коэффициентов электросопротивления и линейного расширения, отнесенного к температуре при нагревании образца  $\alpha 2$ -Ti3Al – б).

В процессе нагрева  $\sim 1000$ К происходит стабилизация структуры образца  $\alpha 2$ -Ti3Al. Температурные зависимости этих параметров при охлаждении существенно отличаются от тех, которые были при нагревании. Это, видимо, свидетельствует о том, что наблюдаемые гистерезисы определяются, в значительной мере, микрокристалличностью (межграничной перестройкой), а не нарушением упорядоченности. Температурная зависимость электросопротивления при охлаждении имеет полупроводниковый характер. Как видно из рисунка 1б, независимо от характера поведения температурных зависимостей сопротивления, их производные по температуре коррелируют с коэффициентом теплового расширения, отнесенным к температуре.

Работа выполнена при поддержке ГЗ № FZNZ-2020-0002.

### Список литературы

1. Likhanov M. S., Shevelkov A. V. Intermetallic compounds with non-metallic properties //Russian Chemical Bulletin. – 2020. – Т. 69. – №. 12. – С. 2231-2255.

А. ЭРГАШЕВА, Д. БОЙМАМАТОВА, У. ХАЛИЛОВ

*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. Арифова, Академии наук Узбекистана, Ташкент, Узбекистан*

## ЭКСТРАКЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНДОЭДРАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

Очистка нефтесодержащих сточных вод является критически важным вопросом, вызванным проблемами окружающей среды и здоровья. Наноструктурированные материалы, особенно углеродные нанотрубки, известны своей эффективностью в адсорбции и разделении. В этом исследовании используется реактивное молекулярно-динамическое моделирование, чтобы предложить научное понимание того, как одностенные углеродные нанотрубки улучшают молекулярное разделение смесей нефти и воды.

A. ERGASHEVA, D. BOYMAMATOVA, U. KHALILOV

*Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan*

## EXTRACTION OF OIL-CONTAINING COMPOUNDS USING ENDOHEDRAL METAL-CONTAINING CARBON NANOTUBES

The treatment of oily wastewater is a critical focus, fueled by environmental and health concerns. Nanostructured materials, particularly carbon nanotubes, are acknowledged for their effectiveness in adsorption and separation. This study utilizes reactive molecular dynamics simulations to offer a scientific understanding of how single-walled carbon nanotubes enhance the molecular-scale separation of oil-water mixtures.

Нефтесодержащие сточные воды, являющиеся значительным загрязнителем водной среды [1], срочно требуют очистки из-за экологических, экономических и медицинских проблем [2,3]. В то время как существующие методы часто не справляются с небольшими каплями нефти и эмульсиями, наноматериалы на основе углерода предлагают многообещающее, но сложное решение для удаления сырой нефти и ее производных из воды [4,5]. Таким образом, это исследование, основанное на моделировании, направлено на понимание природы адсорбции стабильных нефтяных соединений (гексан, октан, нонан и т. д.) на одностенных углеродных нанотрубках (ОУНТ). Для повышения скорости адсорбции в ОУНТ вводятся эндоэдральные наночастицы никеля [6,7]. Предварительные результаты показывают, что этот метод ускоряет физсорбцию сложных нефтяных соединений на поверхности нанотрубок (рис. 1). Эти результаты могут оказаться ценными для экспериментаторов в этой области.

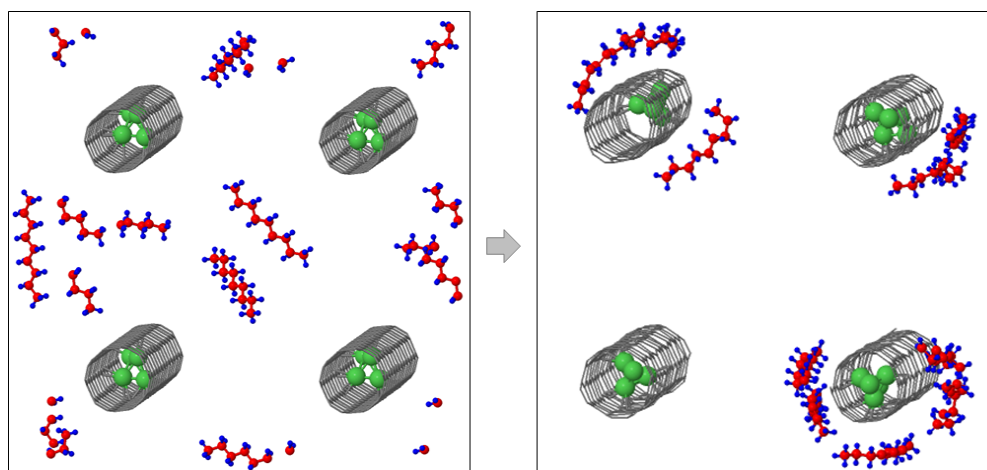


Рис. 1. Процесс адсорбции нефтесодержащих соединений на ОУНТ с эндоэдральными Ni наночастицами

### Список литературы

1. C. J. S. Galdino et al., *Process Biochemistry* 91, 288 (2020).
2. J.-B. Fan et al., *Advanced Functional Materials* 25, 5368 (2015).
3. X. Zhang et al., *Advanced Functional Materials* 23, 2881 (2013).
4. L. Zeng et al., *Applied Surface Science* 523, 146446 (2020).
5. Z. Ghahghaey et al., *Journal of Molecular Liquids* 286, (2019).
6. U. Khalilov et al., *Carbon* 153, 1 (2019).
7. U. Khalilov et al., *International Journal of Hydrogen Energy* (2023).

**Секция**  
**УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И**  
**РАДИАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., проф. Полозов Сергей  
Маркович

Секретарь секции

– к.т.н., доцент Гусарова Мария  
Александровна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 8226

E-mail: SMPolozov@mephi.ru, MAGusarova@mephi.ru

Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>, А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2,3</sup>, А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,4</sup>, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

<sup>4</sup>*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия*

## **ОСОБЕННОСТИ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛЯРИЗОВАННОГО ПУЧКА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ И МАГНИТОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЯХ В ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА ЛЕГКИХ ЯДЕР**

Исследование электрического дипольного момента протона и дейтрона с использованием разного типа накопительных колец включает в себя два общих неукоснительных требования: сохранение поляризации в течение времени порядка 1000 секунд и использование эффективного фактора Лоренца в качестве меры частоты прецессии спина. По ряду причин преимущество чисто электростатического накопителя по сравнению со смешанным кольцом с магнитостатическим и электростатическим полями очевидно с точки зрения поиска электрического дипольного момента, поскольку при смене направления движения частицы направление силы со стороны поля не меняется. Это позволяет легче решить вопрос компенсации систематических ошибок. Однако магнитное и электрическое поля имеют разную природу и, следовательно, разные свойства. В частности, частицы, движущиеся в электрическом поле, изменяют кинетическую энергию, поскольку сила, действующая на частицу, совпадает с направлением движения в отличие от перпендикулярного к движению магнитного поля. В данной работе рассмотрены уравнения движения в электростатических полях и изучаются особенности прецессии спина в таких элементах.

Yu. SENICHEV<sup>1,2</sup>, A. AKSENYEV<sup>1,2,3</sup>, A. MELNIKOV<sup>1,2,4</sup>, S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,*

<sup>3</sup>*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia*

## **FEATURES OF THE SPIN-ORBITAL DYNAMICS OF A POLARIZED BEAM IN ELECTROSTATIC AND MAGNETOSTATIC FIELDS IN THE STUDY OF THE ELECTRIC DIPOLE MOMENT OF LIGHT NUCLEI**

The study of the electric dipole moment of the proton and deuteron using different types of storage rings involves two general rigorous requirements: the conservation of polarization over a period of time on the order of 1000 seconds and the use of the effective Lorentz factor as a measure of the frequency of spin precession. For a number of reasons, the advantage of a purely electrostatic storage device compared to a mixed ring with magnetostatic and electrostatic fields is obvious from the point of view of searching for the electric dipole moment, since when the direction of particle motion changes, the direction of the force from the field does not change. This makes it easier to solve the issue of compensating for systematic errors. However, magnetic and electric fields have different natures and, therefore, different properties. In particular, particles moving in an electric field change kinetic energy because the force acting on the particle coincides with the direction of motion, as opposed to a magnetic field perpendicular to the motion. In this work, the equations of motion in electrostatic fields are considered and the features of spin precession in such elements are studied

А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2,3</sup>, А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,4</sup>, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ФЛИППИНГА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ К РЕЗОНАНСНОЙ ЭНЕРГИИ В ВОЗМУЩЁННОЙ СТРУКТУРЕ NICA С БАЙПАСАМИ

Рассматривается изменение ориентации оси стабильного спина (спин-флиппинг) пучка в структуре ускорителя NICA реализующей состояние квази-замороженности (NICA с байпасами) при приближении к резонансной энергии. В модели ускорителя реализованы несовершенства установки поворотных магнитов и квадруполов. Проведена оценка методически-требуемой скорости установки энергии пучка для сохранения эффективности измерения ЭДМ частотным методом.

A. AKSENTYEV<sup>1,2,3</sup>, A. MELNIKOV<sup>1,2,4</sup>, S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>, Yu. SENICHEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,

<sup>3</sup>National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>4</sup>Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia

## INVESTIGATION OF SPIN-FLIPPING WHEN APPROACHING THE RESONANCE ENERGY IN AN IMPERFECT NICA-BYPASS LATTICE

The phenomenon of spin-flipping in an imperfect quasi-frozen spin NICA lattice (NICA with bypass) when approaching the resonance energy has been considered. NICA lattice imperfections have been modeled as bend magnet and focusing quadrupole misalignments. A methodically-required beam energy setting speed to preserve the efficiency of the frequency method to search for the EDM has been estimated.

При измерении ЭДМ частотным методом настройка фильтров Вина для осуществления спин-замороженного состояния пучка производится один раз за всё время измерения (порядка года). Фактическое осуществление замороженности производится подстройкой энергии пучка во время инжекции. При этом, ось стабильного спина пучка меняет своё направление из вертикального в горизонтальное (определённое только ЭДМ и несовершенствами структуры кольца). [1]

Проводя различие между стационарной и мгновенной понятиями поляризации пучка, особенность ЭДМ-эксперимента в том, что работают с пучком с чисто-мгновенной (т.е. исчезающей) поляризацией. Это накладывает методические условия на величину скорости спин-флиппинга, поскольку в требуемом состоянии ось стабильного спина должна быть перпендикулярна вектору мгновенной поляризации. Если при инжекции пучка в накопитель его собственная ось поляризации сонаправлена с осью стабильного спина в ускорителе, то при приведении накопленного пучка в рабочее состояние переориентировка оси стабильного спина должна происходить со значительным нарушением адиабатичности. [2]

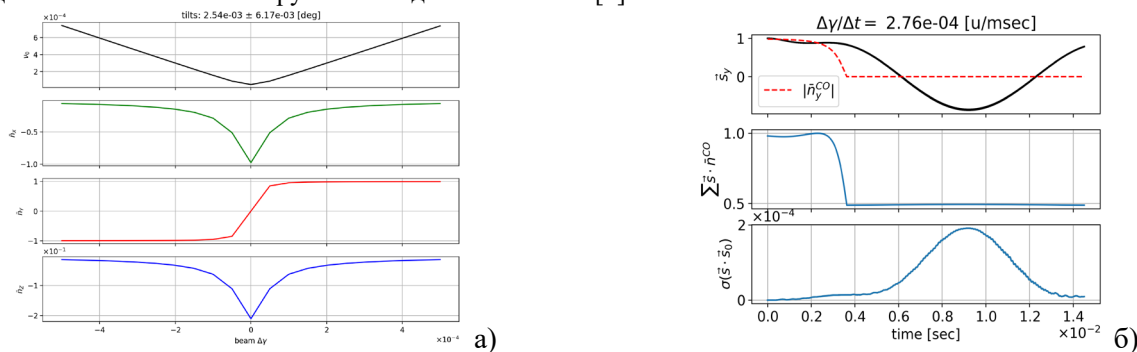


Рис. 1. а) Спин-флиппинг при прохождении резонансной энергии в QFS-структуре;

б) Спин-флиппинг на границе адиабатичности (изменение энергии 2 кэВ/оборот).

Оценки в настоящей модели [3] (наклоны поворотных магнитов на среднеквадратичном уровне 0.1 мрад, вертикальные сдвиги квадруполов от оптической оси 1 мм) показывают, что требуется устанавливать энергию пучка со скоростью выше 10 кэВ/оборот. На этом уровне потери полезной поляризации пучка составляют не более 11%.

### Список литературы

1. Quasi-frozen spin lattice for EDM search and its matrix properties / A. Melnikov [et al.] // Материалы XXVIII международной конференции RuPAC'23 / г. Новосибирск. — 2023. — С. 61-64. — URL: <https://indico.inp.nsk.su/event/114/contributions/2696/>
2. Аксентьев А., Мельников А., Сеничев Ю. Исследование спин-декогеренции пучка при неадиабатичном изменении ориентации оси стабильного спина // Труды 8-й Международной конференции «Лаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 292. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2023/01/Тезисы2022.pdf>
3. ByPass optic design in NICA storage ring for experiment with polarized beams for EDM search / S. Kolokolchikov [et al.]. — J. Phys. Conf. Ser. — 2024. — Vol. 2687. — P. 022026. — DOI: 10.1088/1742-6596/2687/2/022026

С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>, А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2,3</sup>, А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Иститут Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

## ПРОХОЖДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ В ГАРМОНИЧЕСКОМ И БАРЬЕРНОМ ВЧ КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

Рассматривается скачкообразное прохождение критической энергии со сдвигом бетатронной частоты для сохранения стабильности пучка. Коллайдер NICA имеет отличные по своему принципу работы ускоряющие ВЧ станции: барьерная и гармоническая. В силу их особенностей, отличается и динамика продольного движения, влияющая также и на прохождение критической энергии.

S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>, Yu. SENICHEV<sup>1,2</sup>, A. AKSENTYEV<sup>1,2,3</sup>, A. MELNIKOV<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,

<sup>3</sup>National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

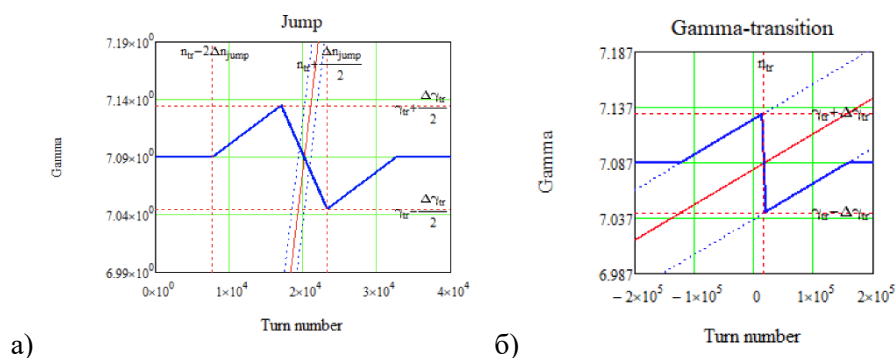
<sup>4</sup>Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia

## TRANSITION ENERGY CROSSING IN HARMONIC AND BARRIER BUCKET RF AT NICA PROTON MODE COLLIDER

The transition energy jump with betatron frequency shift is considered to preserve the stability of the beam. The NICA collider has different accelerating RF stations in its principle of operation: barrier and harmonic. Due to their peculiarities, the dynamics of longitudinal motion also differs, which affects the transition energy crossing.

Критическая энергия коллайдера NICA составляет порядка 5,7 ГэВ и должна быть исследована для протонов на энергии эксперимента 13 ГэВ, так как накладывает ограничения на конечную светимость. Один из рассматриваемых способов сохранить стабильность пучка – быстрый скачок через критическую энергию. [1]

Предполагаемый скачок для NICA, который предполагает модуляцию дисперсии, осуществляемую всеми фокусирующими квадрупольями поворотной арки, что приводит, во-первых, к ограничению темпа изменения критической энергии, во-вторых, сдвигу бетатронных частот и тем самым к ограничению величины скачка.



а)

б)

Рис. 1. а) Принципиальная схема скачка критической энергии в гармоническом ВЧ;

б) Принципиальная схема скачка критической энергии в барьерном ВЧ.

Коллайдер оснащён 3-мя ускоряющими ВЧ-станциями: ВЧ-1 – барьерная, ВЧ-2 и ВЧ-3 – гармонические. [2] В данной. Способы ускорения в таких ВЧ отличны: темп ускорения в барьерном ВЧ крайне мал  $dy/dt = 0.2 c^{-1}$  [3], по сравнению с гармоническим ВЧ, порядка  $dy/dt = 30 - 300 c^{-1}$ . При этом ускорение происходит индукционно для всех частиц, а не сдвигом равновесной фазы. Удержание пучка в фазовой плоскости – отражением от барьеров. Приведённые особенности существенно отличают динамику движения частиц в продольной фазовой плоскости. В обоих случаях необходимо рассматривать условия сохранения стабильности с точки зрения продольной микроволновой неустойчивости.

### Список литературы

1. J. Wei, S.-Y. Lee, Space Charge Effect at Transition Energy and the Transfer of R.F. System at Top Energy, BNL—41667
2. Е. М. Сыресин и др. Формирование поляризованных протонных пучков в ускорительных комплексе NICA, 2021, ЭЧАЯ Т. 52, Вып. 5, С. 1305-1341, <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051>
3. Kolokolchikov, S. and Senichev, Y. and Melnikov, A. and Syresin, E.", Acceleration and crossing of transition energy investigation using an RF structure of the barrier bucket type in the NICA accelerator complex, 10.1088/1742-6596/2420/1/012001, JACoW, IPAC2022, WEP0PT004, 2022

## МАЛЫЙ КОМПТОНОВСКИЙ ИСТОЧНИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА 120 МэВ

Рассмотрена структура проектируемого в НИЯУ МИФИ в рамках проекта по созданию источника гамма излучения на основе электронного накопителя НЦФМ компактного источника на обратном комптоновском рассеянии [1]. Проведена оптимизация магнитной структуры накопительного кольца с использованием генетического алгоритма. Рассмотрена динамика пучка в ЛУЭ-инжекторе и накопительном кольце. Исследовано влияние коллективных эффектов в накопительном кольце на возможность получения требуемых параметров электронного пучка в точке взаимодействия с лазерным импульсом.

S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV, K.S. SAGAN

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

### SMALL 120 MeV COMPTON BACKSCATTERING X-RAY SOURCE

Structure of the compact X-ray source based on Compton back scattering designed at the National Research Nuclear University «MEPhI» as part of the project to create a gamma radiation source based on the electron storage ring NCPhM is considered [1]. The magnetic structure of the storage ring was optimized using a genetic algorithm. Electron beam dynamics in linac injector and the storage ring discussed. The influence of collective effects in the storage ring on the possibility of obtaining the required parameters of the electron beam at the point of interaction with the laser pulse was studied.

В рамках проекта по созданию источника гамма излучения на основе электронного накопителя НЦФМ [1] в НИЯУ МИФИ разрабатывается проект малого комптоновского источника рентгеновского излучения на 70-120 МэВ. В силу востребованности подобных компактных источников комптоновского излучения (ИКИ) работы по их созданию ведутся во многих ускорительных лабораториях мира. В НИЯУ МИФИ подобные работы также проводятся в течении нескольких лет [2-5]. Разрабатываемый источник отличается от разработанных ранее как структурой, так и диапазоном энергий взаимодействующего с лазером электронного пучка. Схема источника и оптические функции магнитной структуры накопительного кольца представлены на рисунке 1.

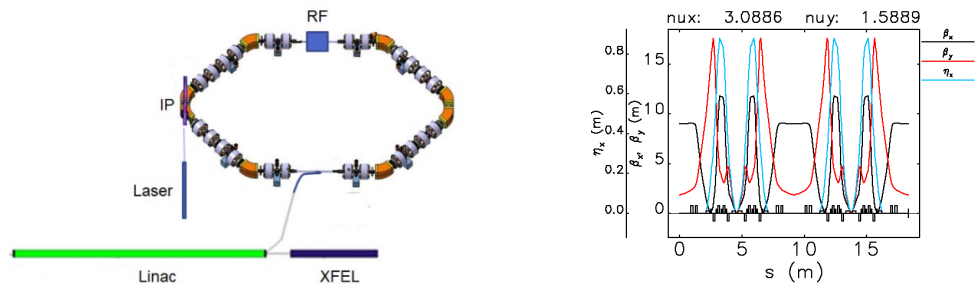


Рис. 1. Схема источника (слева) и оптические функции магнитной системы накопительного кольца (справа)

Планируется создание комбинированного источника рентгеновского излучения как на «прямом» электронном пучке из линейного ускорителя, так и с использованием компактного накопительного кольца. В качестве источника электронов для линейного ускорителя на энергию 70-120 МэВ предполагается использовать фотопушку, состоящую из 3.6 ячеек с энергией на выходе около 10 МэВ. Дальнейшее ускорение электронов происходит в бипериодических ускоряющих секциях на стоячей волне. Полученные таким образом сгустки электронов могут быть использованы для генерации излучения на прямом пучке (обратное комптоновское излучение, черенковское, переходное и т.п.), либо инжектироваться в накопительное кольцо для получения более высокой средней мощности излучения. Проведена оптимизация магнитной структуры накопительного кольца с использованием генетического алгоритма. Основное внимание при оптимизации структуры уделялось получение прецизионных параметров электронного пучка (размеры должны быть соизмеримые с размерами лазерного импульса) для эффективного взаимодействия с излучением лазера. Исследовано влияние коллективных эффектов на динамику электронного пучка в линейном ускорителе и накопительном кольце.

#### Список литературы

1. Национальный Центр Физики и Математики. Проекты «Мегасайтс». [ИНОК НЦФМ \(ncphm.ru\)](http://inok.ncphm.ru)
2. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Proc. of IPAC'21, Campinas, Brazil, 2021, P. 186-188.
3. Dyubkov V.S., Polozov S.M. // Proc. of RuPAC 2021, Alushta, Russia, 2021, P.277-279.
4. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Moscow University Physics Bulletin, 2023 Vol. 78, No. 1, P. 66-73
5. Dyubkov V.S., Polozov S.M., Rashchikov V.I. // Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 11, pp. 2416–2422

## НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО КОМПТОНОВСКОГО ИСТОЧНИКА НЦФМ

Рассмотрена магнитная структура накопительного кольца электронов комптоновского источника НЦФМ. Приводятся оценки динамической апертуры и энергетического акцептанса данного кольца, исследуется влияние эффектов радиационного и лазерного затуханий, внутривидового рассеяния и квантового возбуждения. Определяются характеристики производимого источником рентгеновского излучения.

D.A. BOBYLEV, V.I. SHVEDUNOV  
Moscow State University, Moscow, Russia

## STORAGE RING OF COMPTON SOURCE NCFM

The magnetic structure of the electron storage ring of the Compton source of the NCFM is considered. Estimates of the dynamic aperture and energy acceptance of this ring are given, and the influence of the effects of radiation and laser damping, intra-beam scattering and quantum excitation is studied. The characteristics of the X-ray radiation produced by the source are determined.

В настоящее время во многих научных центрах ведутся работы по созданию источников рентгеновского излучения, основанных на эффекте обратного комптоновского рассеяния. В источниках этого типа рентгеновское излучение генерируется в точке взаимодействия сгустка ускоренных электронов и лазерного излучения. Многие из данных источников включают в себя накопительное кольцо, в котором циркулирует ускоренный пучок электронов, взаимодействующий с лазерным излучением, циркулирующим в оптическом резонаторе. Существует потребность создания источника рентгеновского излучения с энергией, варьируемой в диапазоне десятки — сотни кэВ, для чего необходимо использовать пучки электронов с энергией в диапазоне от нескольких десятков МэВ до более чем 100 МэВ. К примеру, в рамках проекта НЦФМ требуется создать накопительное кольцо комптоновского источника, рассчитанное на диапазон энергий электронов 35 — 120 МэВ.

В настоящей работе исследована магнитная структура накопительного кольца источника рентгеновского излучения, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния, и рассчитанного на применение в диапазоне энергий пучка электронов от 35 МэВ до 120 МэВ.

Схема расположения магнитных элементов кольца изображена на рис. 1.

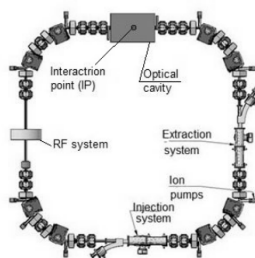


Рис. 1. Магнитная структура накопительного кольца

Для данного накопительного кольца приводятся результаты расчётов динамики электронного пучка и рассматривается влияние эффектов радиационного затухания, квантового возбуждения, лазерного затухания и внутривидового рассеяния. Обсуждаются динамическая апертура и энергетический акцептанс данного кольца. Приводятся результаты расчёта величины спектральной яркости рентгеновского излучения и её изменение с течением времени.

### Список литературы

1. Artyukov I., Savelev A., Shvedunov V., Vinogradov A. Compton X-ray source based on 50-MeV accelerator and its applications. In Proceedings of the LXXII International Conference “NUCLEUS-2022: Fundamental Problems and Applications”. Moscow, Russia. 11-16 July 2022; Stopani K., Zelenskaya N., Eds.; Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics. Amirit: Saratov Russia. 2022; pp. 273-274.
2. Pan Zh., Byrd J., Huang W. et al. Design and dynamic studies for a compact storage ring to generate gamma-ray light source based on Compton backscattering technique. Physical review accelerators and beams 22. 040702 (2019).
3. Vinogradov A., Feshchenko R., Shvedunov V., Artyukov I. Ray tracing simulation of X-ray microdiffraction beamline on the inverse Compton source. Symmetry 2023. 15. 1068.



А. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,3</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>, А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2,4</sup>, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

<sup>3</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия,

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## СПИНОРНОЕ ОПИСАНИЕ СТРУКТУР ТИПА ЗАМОРОЖЕННОГО И КВАЗИ-ЗАМОРОЖЕННОГО СПИНА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭДМ МЕТОДОМ ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

Основные характеристики структур типа замороженного и квази-замороженного спина, такие как направление инвариантной оси и спин-тьюн, были рассчитаны в рамках спинорного формализма. В силу того, что радиальные возмущения поля играют основную роль с точки зрения систематических ошибок в эксперименте по поиску Электрического Дипольного Момент (ЭДМ), различие обоих типов структур было рассмотрено в этом отношении. Была исследована возможность исключения нелинейной добавки к частоте спин-прецессии при изменении направления инжекции в квази-замороженной структуре. Также был получен закон сложения частот для структуры общего вида с возмущениями поля в радиальном, вертикальном и продольном направлениях.

A. MELNIKOV<sup>1,2,3</sup>, Yu. SENICHEV<sup>1,2</sup>, A. AKSENTYEV<sup>1,2,4</sup>, S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,

<sup>3</sup>Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia,

<sup>4</sup>National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SPINOR DESCRIPTION OF FROZEN AND QUASI-FROZEN SPIN STRUCTURES FOR THE EDM MEASUREMENT IN A FREQUENCY DOMAIN

The main features of the frozen and quasi-frozen spin lattice were calculated in the spinor formalism, such as a spin-tune and a direction of the invariant spin axis. As the radial field perturbations play a crucial role in the Electric Dipole Moment (EDM) measurement procedure, the difference of frozen and quasi-frozen spin lattices was investigated in this regard. The possibility of subtraction of a nonlinear term in the spin-precession frequency with the change of the injection direction in the quasi-frozen case was investigated. Furthermore, the frequency summation law was derived for the structure of a general form with perturbations in the radial, vertical and longitudinal directions.

Одним из перспективных методов измерения ЭДМ является метод замороженного спина [1]. При этом вектор спина частиц движется сонаправлено с вектором импульса. Структуры типа замороженного спина представляют собой накопительные кольца, специально спроектированные для решения экспериментальной задачи по поиску ЭДМ. В синхротронах, изначально не предназначенных для поиска ЭДМ, можно реализовать режим квази-замороженного спина [2]. При этом размещаются фильтры Вина на прямых участках, компенсирующие действие поворотных магнитов на спин.

Основным методом измерения ЭДМ, позволяющим достичь точности в  $10^{-29}$  е·см, является метод частотной области. При этом измеряется частота спин-прецессии или спин-тьюн в точке поляриметра в структуре с возмущениями полей в элементах [3]. Можно показать, что в структуре типа замороженного спина с радиальными возмущениями, вращающими спин на углы  $\psi_i$ , спин-тьюн представляется в виде  $\nu_s = \sum_i \psi_i / 2\pi$ . В данной концепции линейного вклада возмущений в измеряемую частоту можно учесть систематическое вращение от Магнитного Дипольного Момент (МДМ) при смене полярности ведущего поля. В структуре типа квази-замороженного спина с радиальными возмущениями каждый магнит вращает спин на угол  $\varphi_i$ . Можно показать, что в этом случае появляется нелинейная добавка к частоте:  $\nu_s - \sum_i \psi_i / 2\pi \sim \varphi_i \psi_j \varphi_k \psi_l$ , где  $i, j, k, l$  – индексы элементов накопителя. В данной работе демонстрируется, что в случае изменения полярности поля, т.е. изменения порядка перемножения матриц и  $\psi_i \rightarrow -\psi_i$ , нелинейная добавка идентична для случая обратной инжекции. Данный факт означает, что систематические эффекты также можно учесть при измерении ЭДМ частотным методом в структуре типа квази-замороженного спина.

Одним из следующих вопросов является получение общей формы сложения частот при наличии возмущений в накопительном кольце во всех трёх направлениях ( $x, y, z$ ). Можно показать, что с точностью до третьего порядка по углам поворота спина измеряемая частота примет вид  $\Omega = \sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}$ . Антиккоммутационная добавка от сложения вращений не влияет на точность измерений метода.

### Список литературы

1. Abusaif F. and others // Tech. Rep. CERN-2021-003 vol 3 (2021).
2. Senichev Y. and others // in Proc. IPAC 22, Bangkok, Thailand pp. 492–495 (2022).
3. Senichev Y. and others // arxiv.org/abs/1711.06512 (2017).

С.Ф. РЕШЕТНИКОВ, А.Г. АФОНИН, Е.В. БАРНОВ, А.Н. ВАСИЛЬЕВ, В.А. МАИШЕЕВ,  
В.В. МОЧАЛОВ, П.А. СЕМЕНОВ, Ю.А. ЧЕСНОКОВ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Протвино, Россия

## ВЫВОД ПУЧКА ПРОТОНОВ ВАРЬИРУЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗ УСКОРИТЕЛЯ У-70 С ПОМОЩЬЮ ИЗОГНУТЫХ КРИСТАЛЛОВ

Рассмотрены результаты работ по выводу пучка протонов варьированной интенсивности из ускорителя У-70, с помощью изогнутых монокристаллов кремния. Продемонстрирована устойчивая работа вывода пучка, с помощью кристаллов, для двух экспериментов, где требовалась плавная регулировка интенсивности пучка в большом динамическом диапазоне.

S.F. RESHETNIKOV, A.G. AFONIN, E.V. BARNOV, A.N. VASILIEV, V.A. MAISHEEV,  
V.V. MOCHALOV, P.A. SEMENOV, Y.A. CHESNOKOV.

National Research Center "Kurchatov Institute" - IHEP (Institute of High Energy Physics), Protvino, Russia

## EXTRACTION OF A PROTON BEAM OF VARIABLE INTENSITY FROM THE U-70 ACCELERATOR USING BENT CRYSTALS

The results of work on the extraction of a proton beam of varying intensity from the U-70 accelerator using bent silicon single crystals are considered. Stable operation of beam extraction using crystals was demonstrated for two experiments where smooth adjustment of the beam intensity over a large dynamic range was required.

Для ряда экспериментов является важным получение протонного пучка с варьированной интенсивностью  $10^6$ - $10^{11}$  частиц/цикл [1]. Медленный вывод столь малой интенсивности не может обеспечить хорошую временную структуру в силу особенностей его динамики. Применение кристаллических дефлекторов с возможностью плавной регулировки наводимого на кристалл пучка и ориентации кристалла по отношению к пучку позволяет решить эту задачу. В данной работе представлены данные о выводе пучка протонов варьированной интенсивности, при выводе с помощью изогнутых кристаллов кремния.

Кристаллические дефлекторы, используемые для вывода заряженных частиц из ускорителя У-70, делятся на два типа. Первые имеют большую длину по пучку ( $L > L_d$ , около 70 мм) и большой изгиб (80 мрад), они способны отклонять заряженные частицы на большие углы, при этом фокусируя их, и без дополнительных магнитооптических элементов забрасывать их каналы транспортировки выведенных пучков. Эффективность таких кристаллических дефлекторов порядка  $10^{-4}$  из-за больших потерь в результате деканализации и низкой кратности прохождения циркулирующего пучка через кристалл.

Вторые имеют небольшие размеры (длина по пучку 5 мм, т.е.  $L \ll L_d$ ) и малый угол изгиба (2 мрад). При работе такие дефлекторы дают небольшое начальное отклонение частиц от циркулирующего пучка, достаточное для заброса в апертуру отклоняющих магнитов, и далее выводятся в каналы транспортировки выведенных пучков. Эффективность таких кристаллических дефлекторов на У-70 достигала рекордных 85% [2].

На ускорителе У-70 была продемонстрирована работа как длинных, так и коротких кристаллических дефлекторов в режиме быстро варьированной интенсивности выводимого пучка в большом динамическом диапазоне. На рисунке 1 представлены интенсивности пучка, выведенного кристаллом на установку "КМН-АТЛАС" в зависимости от напряжения монитора обратной связи и угла ориентации кристалла соответственно.

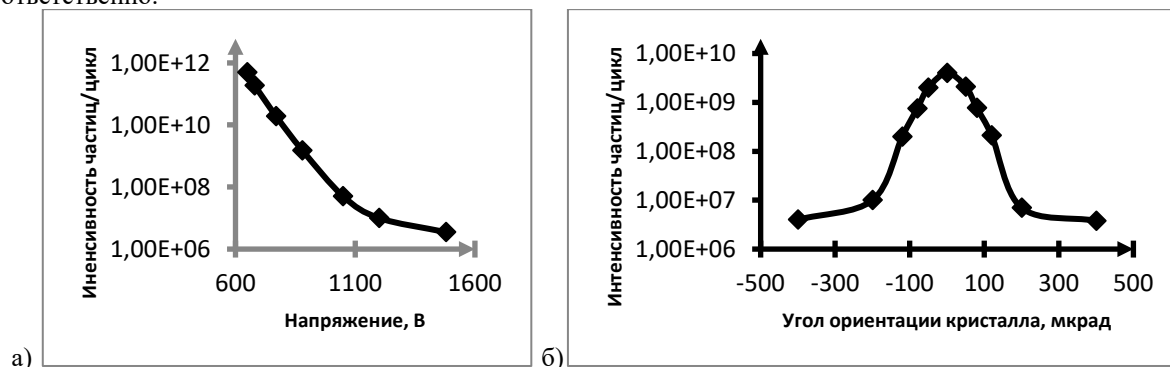


Рис. 1. Интенсивность пучка, выведенного в канал транспортировки частиц: а) в зависимости от монитора обратной связи; б) зависимости от угла ориентации кристалла

### Список литературы

1. A. Glatte, et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 669 (2012) 47–65.
2. В. И. Котов, А. Г. Афонин, В.М. Бирюков и др. "Применение ориентированных кристаллов на ускорителях высоких энергий", ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА, 2005г, том 68, №6, с.1064-1073.

## ТЕОРИЯ ОБЕДНЕНИЯ ФОТОКАТОДА В СВЧ ФОТОПУШКАХ: ТЕКУЩИЙ СТАТУС

Рассмотрена динамика электронного заряда фотокатода под воздействием поля СВЧ резонатора и лазерных импульсов. С учетом дрейфового, диффузионного и генерационного механизмов сформулирована одномерная задача дрейфа-диффузии для электронов проводимости. В отличие от предыдущих, в рамках данной работы фотоэффект индуцирует периодическая последовательность прямоугольных лазерных импульсов с временным профилем  $P(t)$ , а фототок на границе фотокатод-вакуум рассматривается пропорциональным  $P(t)$ . Приводится аналитическое решение сформулированной задачи и обсуждение результатов.

M.V. VLADIMIROV, S.M. POLOZOV, V.I. RASHCHIKOV  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute) – Moscow, Russia

## THEORY FOR PHOTOCATHODE DEPLETION IN RF PHOTOINJECTORS: CURRENT STATE

Photocathode electron charge dynamics under external influences of RF cavity field and laser pulses is studied. Taking into account drift, diffusion and generation mechanisms, a one-dimensional drift-diffusion problem for conduction electrons is posed. In contrast to previous research, in the present, photoelectron effect is induced by a rectangular pulse train with a temporal profile  $P(t)$ , and photocurrent at photocathode-vacuum is considered to be proportional to  $P(t)$ . An analytical solution for the problem under consideration is presented and discussed.

Сверхвысокочастотные (СВЧ) фотопушки позволяют генерировать сверхкороткие электронные сгустки с высоким значениям заряда и, как следствие, играют ключевую роль в ускорительной физике и смежных областях знания [1]. СВЧ фотопушки, в частности, определяют функционирование наиболее передовых источников излучения, включая комптоновские источники, источники СИ последних поколений и лазеры на свободных электронах. Сама возможность генерации пико- и субпикосекундных электронных сгустков объясняется физикой, лежащей в основе работы СВЧ фотопушек: короткие лазерные импульсы, попадая на поверхность фотокатода, закрепленного на торце СВЧ резонатора, индуцируют фотоэффект, а дальнейшее движение вышедших фотоэлектронов (их ускорение и формирование в электронные сгустки) происходит согласно картине электромагнитного поля СВЧ резонатора и фокусирующей системы [2].

В первом приближении профиль извлеченного электронного сгустка повторяет профиль лазерного импульса, а заряд сгустка  $Q$  пропорционален энергии импульса  $W$ . Однако при увеличении  $W$  растет величина  $Q$ , а с ней – и влияние связанных с пространственным зарядом эффектов. Кулоновское взаимодействие между электронами одного сгустка и различными сгустками друг с другом особенно существенно в прикатодной области, когда  $\beta = v/c \ll 1$  и тем больше, чем ярче сгустки.

Обеднение фотокатода под внешними воздействиями в СВЧ фотопушке – сравнительно мало изученный эффект. Учет динамически изменяющегося заряда на фотокатоде приводит к существенному изменению тока инжекции, ограниченного пространственным зарядом [3]. Этот эффект особенно значим для полупроводниковых фотокатодов с высоким значением квантового выхода, которые используются в источниках электронов, генерирующих максимально возможные заряды в сгустках. Образующийся в полупроводниковом слое заряд  $q(t)$  является следствием весьма сложной эволюции распределения электронной концентрации  $n(z, t)$ .

В работе рассматривается динамика электронного заряда в фотокатоде под внешними воздействиями СВЧ фотоинжектора (электромагнитное поле СВЧ резонатора, последовательность лазерных импульсов). С учетом дрейфового, диффузионного и генерационного механизмов формулируется одномерная задача дрейфа-диффузии для электронов проводимости. В рамках данной работы, в отличие от предыдущих, фотоэффект индуцируется периодической последовательностью прямоугольных лазерных импульсов с временным профилем  $P(t)$ , последнему также пропорционален фототок на границе фотокатод-вакуум. Приводится аналитическое решение сформулированной задачи и обсуждение результатов.

### Список литературы

1. Fraser J. S., Sheffield R. L., Gray E. R. A new high-brightness electron injector for free electron lasers driven by RF linacs // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1986. – Т. 250. – №. 1-2. – С. 71-76.
2. Rao T., Dowell D. H. An engineering guide to photoinjectors // arXiv preprint arXiv:1403.7539. – 2014.
3. Polozov S. M., Rashchikov V. I., Krasilnikov M. I. An improved model for photoemission of space charge dominated picosecond electron bunches: theory and experiment // Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conf.(IPAC'21), Campinas, Brazil. – 2021. – С. 2829-2832.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРУБОК ДРЕЙФА В СТРУКТУРАХ IH И SPR

Для структур IH (Inter digital H-type) и SPR (Split Ring) в диапазоне частот от  $\sim 80$  МГц до  $\sim 750$  МГц и энергии протонов  $< 20$  МэВ представлена процедура выбора параметров Трубок Дрейфа (ДТ) для достижения одновременно высокой ВЧ эффективности, электрической прочности и подавления паразитной составляющей электрического поля. С помощью современного программного обеспечения в электростатическом приближении накоплены обширные базы данных вариантов ДТ по шести свободным геометрическим параметрам. Выбор конечного варианта и определение коэффициентов Фурье разложения ускоряющего поля для расчета динамики частиц осуществляется с помощью последовательной полиномиальной интерполяции базы данных.

I.V. RYBAKOV, V.V. PARAMONOV

Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## OPTIMIZATION OF THE DRIFT TUBES PARAMETERS FOR THE IH AND SPR STRUCTURES

For IH (Inter digital H-type) and SPR (Split Ring) structures in the frequency range from  $\sim 80$  MHz to  $\sim 750$  MHz and proton energy  $< 20$  MeV, a procedure for selecting the Drift Tubes (DT) parameters to achieve simultaneously high RF efficiency, electrical strength and suppression of the parasitic component of the electric field is presented. With a modern software in the electrostatic approximation, an extensive database of DT options has been accumulated for six free geometric parameters. The choice of the final option and determination of the Fourier coefficients of the accelerating field for the particle dynamics calculation is carried using sequential polynomial interpolation of the database.

Структуры Inter Digital H-type (IH), [1] и Split ring (SPR) [2] являются ускоряющими структурами для низких энергий ионов. Ускорение частиц происходит в электрическом поле между соседними ДТ, в пространстве около которых сосредоточена основная часть электрического поля. Малые расстояния между ДТ позволяют проводить оценочные расчеты распределений электрического поля между ДТ в электростатическом 3D приближении и использовать для описания структур также понятия колебательных систем с сосредоточенными параметрами – контуров.

Рассматривая интегральные ВЧ характеристики этих структур как систем с распределёнными, так и с сосредоточенными распределениями полей, введен параметр  $T^2/\beta C^2 \sim Z_e$ , описывающий ВЧ эффективность структур, где  $Z_e$  – погонное эффективное шунтовое сопротивление,  $T$  – коэффициент пролетного времени,  $C$  – емкость зазора между ДТ. Из возможных конфигураций ДТ, направленных на подавление паразитной перпендикулярной составляющей электрического поля, выбрана технологически просто реализуемая конфигурация с наклоном торцов ДТ, при прочих равных обеспечивающая меньшую величину  $C$  [3] и соответственно наибольшую величину  $Z_e$ . Геометрические параметры ДТ для такой конфигурации представлены на рис. 1а.

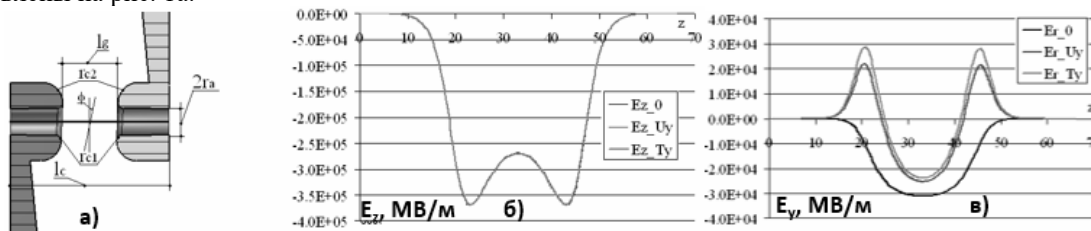


Рис. 1. Обозначения характерных размеров конфигурации ДТ со скошенными торцами (а); распределение компонент  $E_z$  (б),  $E_y$  (в) в зазоре ДТ с различной величиной наклона торцов ДТ

Для накопления базы данных параметры ДТ (рис. 1а) варьируются в диапазонах, выбранных на основе предварительного анализа размеров ДТ структур IH и SPR, применяемых на различных частотах. Накопленная база вариантов является шестимерным массивом и перекрывает, с применением масштабирования, области практического применения структур по частоте от  $\sim 80$  МГц до  $\sim 750$  МГц и энергии протонов  $< 20$  МэВ. С помощью последовательной полиномиальной интерполяции размерность массива сокращается до искомого набора параметров ДТ на заданной частоте и энергии частиц, и соответствующих коэффициентов Фурье разложения ускоряющего поля для расчетов динамики частиц. Как показано на рис. 1б, использование скошенных торцов ДТ не приводит к изменению распределения ускоряющего поля  $E_z$ . Влияние поперечной составляющей поля подавляется [4], рис. 1в, выбором угла скоса ДТ для выполнения условия  $T_y = 0$ , где  $T_y$  – коэффициент пролетного времени поперечного поля.

Список литературы

1. T. Weis et. al. // Proc. Linac 1984, p. 417.
2. A. Schempp et. al. // Proc. Linac 1979, p. 159.
3. S. S. Kurennoy et al. // Phys. Rev. Accel. Beams 15, 090101, 2012.
4. A. Facco, V. Zvjagintsev // Phys. Rev. Accel. Beams 14, 070101, 2011.

А. СУХОЦКИЙ<sup>1</sup>, Г. ВОЛЫНЕЦ<sup>1</sup>, Е. ГУРНЕВИЧ<sup>1</sup>, С.ГУСЕВ<sup>1</sup>, Д. БЫЧЕНОК<sup>1</sup>,  
М. ЛАЛАЯН<sup>2</sup>, М. ГУСАРОВА<sup>2</sup>, С. ПОЛОЗОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных проблем БГУ, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВВОДА МОЩНОСТИ С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ СВЯЗИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ СВОЙСТВ КОАКСИАЛЬНЫХ ПОЛУВОЛНОВЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

Рассмотрены особенности использования устройства ввода мощности с перестраиваемым коэффициентом связи при тестировании ниобиевых полуволновых резонаторов в сверхпроводящем состоянии. Проведено сравнение свойств резонатора при различных положениях центрального штыря ввода мощности при уровнях связи, близких к критическому.

A. SUKHOTSKI<sup>1</sup>, G. WALYNETS<sup>1</sup>, E. GURNEVICH<sup>1</sup>, S. HUSEU<sup>1</sup>, D. BYCHANOK<sup>1</sup>  
M. LALAYAN<sup>2</sup>, M. GUSAROVA<sup>2</sup>, S. POLOZOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Problems, Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## ADJUSTABLE POWER INPUT FOR CHARACTERISATION OF COAXIAL HALF-WAVE SUPERCONDUCTING CAVITIES

The general principles of operation of an adjustable power input device for testing niobium half-wave resonators in the superconducting state are considered. The properties of cavity with different power input coupling levels are compared and analyzed.

При тестировании свойств ниобиевых полуволновых резонаторов HWR-325 [1-3] традиционно используются два устройства связи: ввод мощности и полевая антенна. Они располагаются в патрубках центральной части резонатора перпендикулярно оси пучка. В этой области находится максимум электрического поля основной моды резонатора, поэтому устройства связи представляют собой электрически связанные антенны и имеют форму цилиндров, оканчивающихся полусферой.

При захлаживании резонатора происходит уменьшение его геометрических размеров, а также при температурах ниже 9.2 К ниобий переходит в сверхпроводящее состояние. Эти факторы оказывают определяющее влияние на уровень связи устройства ввода мощности. Очень трудно заранее оценить положение штыря ввода мощности при комнатной температуре, обеспечивающее критическую связь при температуре жидкого гелия.

Для решения этой проблемы предложена конструкция перестраиваемого ввода мощности (Рисунок 1), позволяющая варьировать коэффициент связи  $\beta$  с резонатором при работе в вакууме при температуре жидкого гелия.

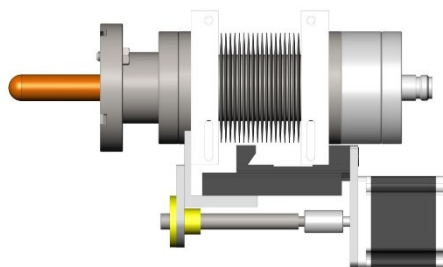


Рис. 1. Устройство ввода мощности с возможностью перестройки коэффициента связи, рассчитанное для работы в условиях вакуума при температуре жидкого гелия.

Предложенный ввод мощности использовался при тестировании свойств прототипа HWR-325 в сверхпроводящем состоянии в прокачанном криостате [3]. Использование подстройки позволило добиться критической связи, а также провести типичные измерения свойств резонатора при  $\beta=1$ ,  $\beta>1$  и  $\beta<1$ .

### Список литературы

2. D. Bychanok et al, Control of electromagnetic properties during prototyping, fabrication and operation of low-beta 325 MHz half-wave resonators, Journal of Physics D: Applied Physics 54, 255502 (2021).
3. T. Powers, Practical aspects of srf cavity testing and operations (2011) pp. 60-63
4. D. Bychanok, E. Gurnevich, A. Sukhotski, G. Walynets, S. Huseu, S. Maksimenko, V. Petrakovski, A. Pakrouski, I. Pobol, V. Zaleski, Y. Tamashevich, M. Gusarova, M. Lalayan, S. Polozov, D. Nikiforov, Y. Bespalov, A. Butenko, E. Syresin "Quality factor characterization of superconductive low-beta 325 MHz half-wave resonators at low microwave field amplitudes", ID167, XXVIII RUSSIAN PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, 11-15 September 2023, p.177-179.

М.С. САРАТОВСКИХ, А.Н. ЗИМИН, Е.С. САРАТОВСКИХ, В.М. ГЛАДКОВ, А.Ю. ОРЛОВ,  
П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ОПЕРАТОРСКОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ МИКРОСЕРВИСНОЙ АРХИТЕКТУРЫ И ПРИМЕНЕНИЕ НА УСКОРИТЕЛЕ ТИП

В работе описаны основные программные компоненты и принципы разработки распределенной системы управления (PCY) и системы операторского контроля «ГРАНАТ» на основе микросервисной архитектуры в рамках работы на кластере высокой доступности [1]. Описано применение системы операторского контроля для контроля состояния вакуумной системы ТИПр. Приведены и описаны основные элементы программных компонент операторского контроля и PCY. Описан процесс конвейерной сборки и публикации программных средств в рабочую продуктивную среду, реализующий принцип непрерывной интеграции. Схематично представлен механизм взаимодействия ключевых компонент между собой. Описано размещение оперативных данных в распределенном кеше и запись архивных данных в timescale базу данных Influx. Продемонстрирован механизм размещения сервисов управления при помощи системы контейнеризации Docker и оркестрации контейнеров Kubernetes. Показаны примеры сервисов взаимодействия с пользователями в среде разрабатываемой системы операторского контроля «ГРАНАТ». Продемонстрирована интеграция сервиса визуализации Grafana в рабочую среду PCY.

M.S. SARATOVSKIKH, A.N. ZIMIN, E.S. SARATOVSKIKH, V.M. GLADKOV, A.YU. ORLOV,  
P.A. FEDIN, T.V. KULEVOY

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## MANAGEMENT AND OPERATOR CONTROL SYSTEM BASED ON MICROSERVICE ARCHITECTURE AND APPLICATION ON THE HIPR ACCELERATOR

The report describes the main software components and developing principles a distributed control system (DCS) and operator control system “GRANAT” based on a microservice architecture within the framework of work on a high-availability cluster [1]. The operator control system using to monitor the condition of the HIPr vacuum system is described. The main elements of the software operator control components and DCS are presented and described. The pipeline assembly process and software publication into a working product environment implementing the continuous integration principle is described. The mechanism of key components interaction with each other is schematically presented. The operational data placement in a distributed cache and recording of archived data in the Influx timescale database is described. A mechanism for hosting management services using the Docker containerization system and Kubernetes container orchestration is demonstrated. Examples of services for interaction with users in the developed operator control system “GRANAT” environment are shown. The integration of the Grafana visualization service into the DCS working environment was demonstrated.

При работе с большими электрофизическими установками, такими как линейный или кольцевой ускоритель необходимы системы аппаратного управления и диспетчерского на уровне оператора. Аппаратное управление определяется производителем конкретного прибора и служит в том числе для автоматического управления устройством при нештатных ситуациях. Система диспетчерского контроля определяет порядок взаимодействия как пользователей с устройствами и данными с этих устройств, так и процесс взаимодействия подсистем лабораторной установки между собой. Подобная система должна обладать высокой отказоустойчивостью, скоростью взаимодействия с данными и достаточным набором функций в сочетании с наглядным интерфейсом пользователя, позволяющим оперативно принимать решения, адекватные текущей ситуации. Данные критерии реализуются в распределённой системе управления (PCY) «ГРАНАТ», тестируемой на ускорителе ТИПр в НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ. На рисунке 1 представлена схема обмена данными и командами в PCY «ГРАНАТ». PCY создаётся с применением современных практик разработки программного обеспечения на базе микросервисной архитектуры, что позволяет гарантировать работоспособность PCY даже при выходе из строя части серверного оборудования.



Рис. 1. Цепочка доведения целевой информации от измерительного устройства и обратно – в виде выдачи команд управления на прибор.

### Список литературы

1. Ньюмен С. От монолита к микросервисам // СПб: БХВ-Петербург, 2021, 272 с.

## ОСОБЕННОСТИ БЫСТРОЙ РЕГУЛИРОВКИ ВЫХОДНОЙ ЭНЕРГИИ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ДЛЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

Суммируются результаты исследований процессов при быстрой регулировке выходной энергии линейного ускорителя (ЛУ) протонов за время одного ВЧ импульса. Упоминаются как особенности формирования необходимого импульса ВЧ питания, так и распространения ВЧ импульса в безынерционной дисперсной структуре на бегущей волне. Особое внимание уделено динамике частиц в нестационарном электромагнитном ВЧ поле. Применение рассматриваемого метода регулировки позволит многократно повысить скорость сканирования по глубине объекта облучения.

L. OVCHINNIKOVA, A.P. DURKIN, V.V. PARAMONOV  
INR RAS, Moscow, Russia

## FEATURES OF FAST REGULATION OF OUTPUT ENERGY IN LINEAR ACCELERATOR FOR PROTON THERAPY

The results of studies of processes during rapid regulation of output energy of linear accelerator of protons during one RF pulse are summarized. Mention is of both formation of required RF power pulse and propagation of RF pulse in inertialess dispersed traveling wave structure. Particular attention is paid to beam dynamics in a non-stationary electromagnetic RF pulse. Use of regulation method under consideration will greatly increase speed of scanning along depth in irradiated object.

Регулировка выходной энергии (ВЭ) ЛУ протонов [1] необходима для сканирования по глубине объекта облучения. Для обеспечения стабильности работы мощного ВЧ оборудования рассматривается регулировка ВЭ изменением только фазы ВЧ сигнала на низком уровне ВЧ мощности. Исследование распространения мощного ВЧ импульса в безынерционной дисперсной структуре на бегущей волне проведено в [2] и показывает естественное расплывание фронта изменения фазы.

Динамика движения сгустков исследована с учётом высших пространственных гармоник в поле бегущей волны. Для устранения дефокусировки ускоряющим полем рассматривается изменение фазы в положительном направлении. Это обеспечивает устойчивость поперечного движения сгустков при регулировке. Существенная регулировка ВЭ возможна только при нарушении условия автофазировки, когда сгусток частью или полностью движется вне сепаратрисы. Движению вне сепаратрисы обеспечивает наиболее быстрое изменение ВЭ с изменением фазы ВЧ поля, Параметром, определяющим диапазон эффективного изменения ВЭ и связывающего его с диапазоном необходимого изменения фазы ВЧ поля является набег фазы центральной частицы сгустка – разность фаз этой частицы при входе и выходе из ускоряющей секции.

При движении вне сепаратрисы существенно возрастает разброс частиц сгустка по энергии. Но это характерно и для других методов регулировки ВЭ, например с изменением как фазы, так и амплитуды ускоряющего поля. Основные результаты моделирования приведены на рис. 1 на примере последней секции ЛУ [1], предназначенной для ускорения протонов от 200 до 230 МэВ.

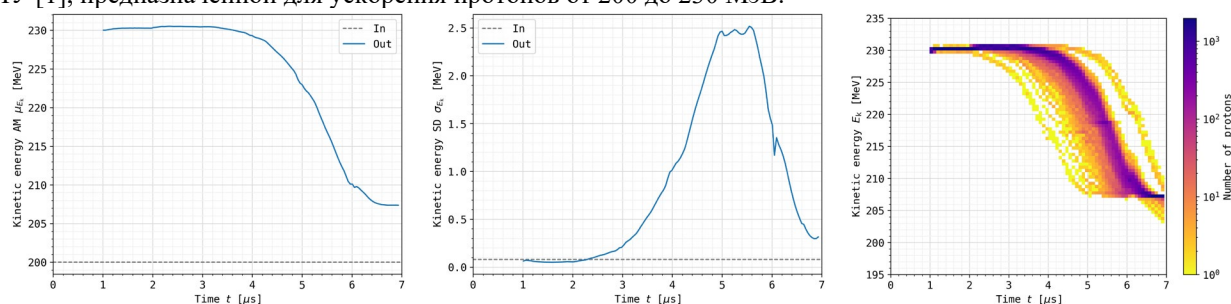


Рис. 1. Зависимости средней энергии и стандартного отклонения энергии от времени, гистограмма энергии частиц от времени.

Применение данной методики регулировки ВЭ на порядки увеличит скорость сканирования по глубине по сравнению с регулировкой от одного ВЧ импульса к другому.

Авторы признательны А.А. Коломийцу за предоставленные данные о характеристиках пучка ЛУ в режиме номинального ускорения.

### Список литературы

1. V.V. Paramonov, A.P. Durkin, A. Kolomiets, "A Linear Accelerator for Proton Therapy", in Proc. RuPAC'21, pp. 117-119, 2021. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04>
2. L. Ovchinnikova, V. Paramonov, "Simulation Technique for RF Signal Propagation in TW Structure for Medical Proton Linac", Physics of Atomic Nuclei, vol. 86, no. 12, pp. 2675-2679, 2023. <https://doi.org/10.1134/S1063778823110340>

## РАЗРАБОТКА ДВУХСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИКЛАДНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ЭНЕРГИЮ 8 МЭВ

Рассмотрены особенности проектирования линейного ускорителя электронов, связанные с расчетом двухсекционной ускоряющей структуры и вводов высокочастотной мощности. Проведено моделирование динамики пучка электронов в ускорителе с помощью программы BEAMDULAC-BL. По результатам проведена настройка модели ускоряющей структуры с вводами мощности, получены значения электродинамических характеристик.

A. A. BATOV, R. A. ZBRUEV, T. V. BONDARENKO, S. M. POLOZOV, M. V. LALAYAN  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF A TWO-SECTION 8 MEV LINEAR ELECTRON ACCELERATOR FOR APPLIED PURPOSES

The paper considers the design features of a linear electron accelerator related to the development of a two-section accelerating structure and high-frequency power coupler devices. The electron beam dynamics was simulated using BEAMDULAC-BL code. The model of the accelerating structure with the coupling devices were adjusted using the simulation results. The desired values of the electrodynamic characteristics were obtained.

Линейные ускорители электронов S-диапазона являются популярным видом установок прикладного назначения. Такие установки могут применяться в различных областях: стерилизация инструментов и продуктов, гамма-активационный анализ, дозиметрия, радиационная терапия. Коллективом НИЯУ МИФИ разработан ряд линейных ускорителей прикладного назначения на базе бипериодической ускоряющей структуры [1-6].

В работе представлен новый проект двухсекционного линейного ускорителя электронов прикладного назначения. Проведено моделирование с целью оптимизации геометрии ускоряющей структуры и получения значений электродинамических характеристик. Концепт ускорителя скорректирован с учетом конструктивных требований и может быть использован для дальнейшего создания опытного образца.

Ускоряющая секция установки состоит из двух структур S-диапазона длиной 12 (из них 6 ячеек группирователя) и 8 ячеек соответственно. Для каждой из структур разработан симметричный ввод мощности. Ввод мощности представляет собой прямоугольный волновод с размерами поперечного сечения 90x45 мм (также был рассмотрен вариант волновода с сечением 72x34 мм). Некоторые параметры ускоряющих структур и соответствующих им вводов мощности представлены в таблице 1. Вид ускоряющей секции представлен на рисунке 1.

Таблица 1. Параметры ускоряющих структур линейного ускорителя электронов прикладного назначения.

Секция, число ячеек	12 ячеек	8 ячеек
S <sub>11</sub> ввода мощности структуры	0.76	0.78
Шунтовое сопротивление, Мом/м	79	78
Коэффициент связи между ячейками, %	10.6	10.6

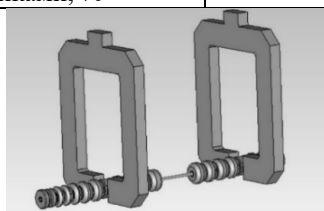


Рис. 1. Ускоряющая секция линейного ускорителя электронов прикладного назначения.

### Список литературы

1. Polozov S. M., Rashchikov V. I., Demsky M. I. Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 493-495.
2. BasyI D. S. et al. Commissioning and first tests of the new standing wave 10 MeV electron accelerator //Proceedings of the 25th Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC 2016), St. Petersburg, Russia. – 2016. – С. 173-175.
3. Polozov S. et al. Beam Dynamics Optimization and Future Plans for LUE-200 Linac Upgrade //7th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'16), Busan, Korea, May 8-13, 2016. – JACOW, Geneva, Switzerland, 2016. – С. 1788-1790.
4. Batov A. A. et al. Developing and Optimizing the S-Band Accelerating Structure and Coupling Device for the Radiation Therapy Facility //Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 699-703.
5. Batov A. A. et al. Control of Electrodynamical Characteristics of Biperiodic Accelerating Structure Cells During Manufacturing //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 11. – С. 2411-2415.
6. Samarokov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.



## РАЗРАБОТКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ГЕНЕРАТОРА-ДРАЙВЕРА КЛИСТРОНА С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2,8 ГГц

Разработана блок-схема усилителя для импульсного генератора-драйвера клистрона. Приведены топологии плат для первого и второго усилительных модулей в схеме. Произведена сборка и настройка макетов первого и второго усилительных модулей.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, S.A. TUMANOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

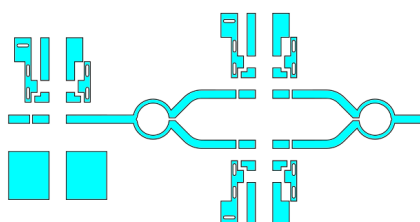
## DEVELOPMENT OF AMPLIFIER MODULES FOR A KLYSTRON PULSE GENERATOR DRIVER WITH AN OPERATING FREQUENCY OF 2.8 GHz

A block diagram of an amplifier for a klystron pulse generator driver has been developed. The topologies of the boards for the first and second amplifier modules in the circuit are given. The layouts of the first and second amplifier modules have been assembled and configured.

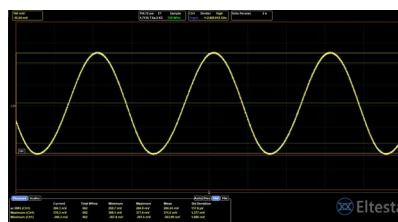
Наиболее простым и дешевым способом получения мощности порядка нескольких десятков МВт на частотах в несколько ГГц являются клистроны. В настоящее время в НИЯУ МИФИ разрабатываются усилительные модули для клистрона, способного выдавать несколько десятков МВт мощности на частоте  $f = 2,8$  ГГц. Для необходимой модуляции пучка в первый резонатор клистрона необходимо подавать импульсы с длительностью  $\tau = 8$  мкс со скважностью  $\gamma = 0,0008$ . При этом импульсная мощность должна составлять 120 Вт.

Для получения импульсной мощности  $P = 120$  Вт была разработана схема, включающая 3 усилительных модуля. При этом предварительные расчетные мощности на выходе каждого модуля составляют  $P_{\text{вых1}} = 2$  Вт,  $P_{\text{вых2}} = 20$  Вт,  $P_{\text{вых3}} = 120$  Вт соответственно. Первый модуль представляет из себя сборку, которая состоит из транзистора 3П618А производства «Планета-Аргалл», после которого расположены еще два таких же транзистора, соединенных параллельно при помощи мостов Вилкинсона. Каждый из транзисторов 3П618А способен выдавать несколько сотен мВт постоянной мощности на частоте  $f = 2,8$  ГГц.

Второй усилительный модуль построен на кремниевом полевом, импульсном транзисторе MPAL2731M30, выполненном по технологии LDMOS. Коэффициент усиления данного транзистора составляет 15 Дб. Третий усилительный модуль строится на биполярном мощном СВЧ транзисторе IB2729M120, выдающем 120 Вт выходной мощности при входной мощности порядка 20 Вт.



а - Топология первого усилительного модуля.



б - Сигнал после первого усилительного модуля.

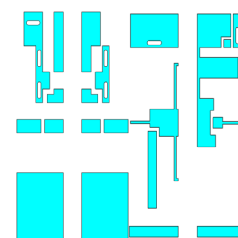


Рис.2 Топология второго и третьего усилительного модуля

Рис.1. Первый усилительный модуль

Была произведена сборка макетов первого и второго усилительного модуля, а также измерены их основные характеристики.

В результате измерений выходная мощность первого усилительного модуля в каскаде составила  $P_{\text{вых1}} = 330$  мВт, а коэффициент усиления  $k = 15,2$  Дб на частоте  $f = 2,8$  ГГц. Для работы второго усилительного модуля в нормальном режиме необходимо 2 Вт импульсной мощности. В связи с этим для его испытаний между первым и вторым модулем ставился промежуточный модуль, строящийся на транзисторе ИЛТ2731М30 на выходе которого мощность составляла 2 Вт. При этом на выходе второго модуля было получено 20 Вт импульсной мощности, а коэффициент усиления данного модуля соответствовал  $k = 10$  Дб.

В итоге были разработаны схемы для первых двух усилительных модулей каскада. Произведена сборка их макетов и измерены их основные характеристики.

Д.К. ПУГАЧЕВ, С.Л. БОГОМОЛОВ, А.Е. БОНДАРЧЕНКО, К.И. БЕРЕСТОВ,  
К.И. КУЗЬМЕНКОВ, В.Н. ЛОГИНОВ, А.Н. ЛЕБЕДЕВ, В.Е. МИРОНОВ, Д.С. ПОДОЙНИКОВ  
*Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, Россия*

## РАЗРАБОТКА ЭЦР-ИСТОЧНИКА ИОНОВ DECRIS-5M ДЛЯ ЦИКЛОТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЦ-140

Циклотронный комплекс ДЦ-140, создаваемый в Лаборатории ядерных реакций, предназначен для решения широкого круга прикладных задач с использованием ускоренных пучков тяжелых ионов. Планируется проведение исследований в области радиационной физики твердого тела, разработка и производство трековых мембран (ядерных фильтров), изучение радиационной стойкости электронных компонентов и ряд других актуальных задач. Для проведения экспериментов ускоритель должен обеспечивать получение ускоренных пучков ионов с двумя фиксированными энергиями – 2.1 МэВ/нуклон и 4.8 МэВ/нуклон в диапазоне масс от Ne до Bi и интенсивностью до  $10^{12}$  част/сек (для ионов Xe) на мишени. В соответствии с рабочей диаграммой циклотрона ДЦ-140 источник ионов должен обеспечивать получение пучков ионов с отношением массы к заряду в диапазоне  $A/Z = 5 \div 8$  ( $Ne^{4+} \div Bi^{38+}$ ).

D.K. PUGACHEV, S.L. BOGOMOLOV, A.E. BONDARCHENKO, K.I. BERESTOV, K.I. KUZMENKOV, V.N. LOGINOV, A.N. LEBEDEV, V.E. MIRONOV, D.S. PODOINIKOV  
*Joint Institute for Nuclear Research (JINR), Dubna, Russia*

## DEVELOPMENT OF THE ECR ION SOURCE DECRIS-5M FOR THE CYCLOTRON COMPLEX DC-140

The cyclotron complex DC-140, which is under development at the Laboratory of Nuclear Reactions, is designed to solve a wide range of applied research with the use of heavy ions accelerated beams. The research works on radiation physics, radiation resistance of materials and the production of track membranes are planned. Following the requirements of experiments DC-140 should accelerate the heavy ions up to fixed energies 2.1 and 4.8 MeV per unit mass in a wide mass range from Ne to Bi with the intensity up to  $10^{12}$  particles per second (for Xe ions). In accordance with the working diagram of DC-140 cyclotron the ion source should provide the ion beams with mass-to-charge ratio  $A/Z$  of the range from 5 to 8 (from  $Ne^{4+}$  to  $Bi^{38+}$ ).

В качестве прототипа для создания ЭЦР-источника DECRIS-5M для циклотрона ДЦ-140, выбран источник, разработанный в ЛЯР для циклотрона DC-110 [1]. С учетом опыта разработки и эксплуатации подобных систем, и в соответствии с требованиями, предъявляемыми к интенсивности и заряду получаемых ионов, проведена модернизация элементов магнитной системы и других элементов источника. Общий вид источника представлен на Рис.1.

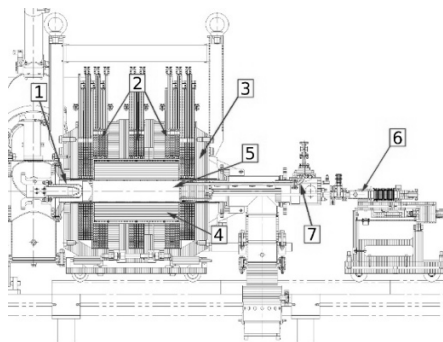


Рис. 1. Поперечный разрез ЭЦР-источника ионов DECRIS-5M:

1. Система экстракции; 2. Катушки; 3. Ядро из мягкого железа; 4. Гексапольный магнит; 5. Плазменная камера; 6. Устройство ввода твердых веществ; 7. Волновод

В работе представлены данные расчетов и измерений параметров магнитной системы источника. В настоящее время источник DECRIS-5M установлен на стенде ЭЦР источников для проведения экспериментов по получению пучков многозарядных ионов.

### Список литературы

1. Gikal, B.N., Dmitriev, S.N., Gul'bekyan, G.G. et al. Development, creation, and startup of the DC-110 heavy ion cyclotron complex for industrial production of track membranes. Phys. Part. Nuclei Lett. 11, 137–150 (2014). <https://doi.org/10.1134/S1547477114020204>

## НАГРЕВ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА ВАКУУМНОЙ НЕЙТРОННОЙ ТРУБКИ ПОРТАТИВНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Проанализированы возникновение и динамика обратных электронных потоков в разрядном промежутке вакуумной нейтронной трубки, приводящих к интенсивному нагреву элементов разрядного узла вплоть до их плавления. Рассмотрены различные конфигурации разрядного промежутка, значительно уменьшающие интенсивность его нагрева, а также способы подавления обратных электронных потоков.

D.S. STEPANOV, A.P. SKRIPNIK, E.Y. SHKOLNIKOV  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## HEATING OF THE DISCHARGE GAP ELEMENTS OF A VACUUM NEUTRON TUBE OF A PORTABLE NEUTRON GENERATOR

The occurrence and dynamics of reverse electron flows in the discharge gap of a vacuum neutron tube, leading to intense heating of the elements of the discharge unit up to their melting, have been analyzed. Various configurations of the discharge gap are considered, which significantly reduce the intensity of its heating, as well as methods for suppressing reverse electron flows.

Проведенные исследования, а также эксплуатация вакуумных нейтронных трубок (ВНТ) в различных технологиях показали, что основной причиной интенсивного нагрева элементов разрядного узла ВНТ является воздействие обратных потоков электронов. Генерация этих потоков происходит благодаря вторичной ионно-электронной эмиссии из мишени и антидинаatronной сетки, и ионизации рабочего газа. Моделирование этих процессов произведено для рабочего режима ВНТ ( $10^8$  н/имп, 10 А) с использованием кода KARAT и пакета CST Mphysics для исследования термодинамических процессов. Преодоление электростатического барьера антидинаatronной сетки происходит благодаря пространственному заряду дейтериевого потока из разрядного узла. При этом отсутствие остаточного газа приводит к практической невозможности нагрева элементов разрядного узла до значительных температур за времена порядка десятков минут. Добавление в модель конечной концентрации рабочего газа показало, что вторичные ионы от ионизации рабочего газа замещают собой ионы из плазмы в их общем потоке на мишень (ограниченном пространственным зарядом), чем снижают результирующий нейтронный выход. Увеличение давления остаточного газа в объеме ВНТ приводит к росту концентрации ионов, что влечет за собой усиление проникновения вторичных электронов из мишени за антидинаatronную сетку. Таким образом, существенный вклад в тепловую нагрузку на источнике плазмы вносят электроны из мишени, однако эту возможность они получают благодаря ионизации остаточного газа. При этом, электроны, образующиеся от ионизации остаточного газа начинают вносить заметный вклад в нагрев начиная с давления в 50 мТорр.

Анализ различных конфигураций ускоряющего промежутка – антидинаatronной сетки продемонстрировал следующие распределения тока обратных электронов на электродах ВНТ, представленные в таблице 1.

Таблица 2. Влияние различных конфигураций антидинаatronной сетки на электронные токи на электродах ВНТ (50 мТорр).

	Плоская сетка		Выгнутая сетка		Малый шар		Большой шар		Центральная шпилька	
	Мишень	Газ	Мишень	Газ	Мишень	Газ	Мишень	Газ	Мишень	Газ
Катод	1.1 А	0.4 А	1.8 А	0.7 А	1.1 А	0.3 А	0.9 А	0.2 А	0.5 А	0.3 А
Шпилька	1.0 А	0.5 А	0.2 А	0.3 А	1.3 А	0.6 А	0.7 А	0.2 А	0.6 А	0.4 А
Подж. эл.	3.2 А	1.3 А	1.3 А	0.9 А	3.3 А	1.3 А	1.9 А	0.7 А	2.3 А	0.8 А
Сумма	5.3 А	2.2 А	3.3 А	1.9 А	5.7 А	2.2 А	3.5 А	1.1 А	3.4 А	1.5 А
	7.5 А		5.2 А		7.9 А		4.6 А		4.9 А	

Добавление к антидинаatronной сетке соответствующим образом ориентированного магнитного поля с индукцией ~ 500 Гс, позволит значительно сократить нагрев электродов ВНТ, вплоть до величин 100 °С за 10 минут.

### Список литературы

1. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KARAT: дис. д-ра физ. мат. наук. ОИВТ РАН и ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, 2011.

И.Д. САДОФЬЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РАДИАЦИОННЫЕ ПОЛЯ ИСТОЧНИКА СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА 6 ГЭВ**

Рассмотрены синхротроны с энергиями 6 ГэВ как источники облучения. Получены характеристики тормозного и фотонейтронного излучений, создаваемых электронным пучком синхротрона в зоне вывода синхротронного излучения, в пределах канала синхротрона, а также за пределами его защиты.

I.D. SADOFIEV

*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **RADIATION FIELDS OF A SYNCHROTRON RADIATION SOURCE BASED ON A 6 GEV ELECTRON ACCELERATOR**

Synchrotrons with energies of 6 GeV as sources of radiation exposure are considered. The characteristics of bremsstrahlung and photoneutron radiation generated by a synchrotron electron beam in the synchrotron radiation output zone, within the synchrotron channel, as well as outside its shielding are obtained.

Выполнены расчеты радиационных полей, создаваемых электронными ускорителями на 6 ГэВ с токами пучка на 200 мА (ESRF, Франция) и 700 мА (проектируемый ускоритель СИЛА, Россия), используемыми в качестве источников синхротронного излучения (СИ). Получены характеристики радиационной обстановки, созданной тормозным излучением в остаточном воздухе вакуумной камеры, а также от потерь частиц на скраперах – коллиматорах электронного пучка. Рассмотрена радиационная обстановка в зоне вывода пучка СИ. Учтены вторичные заряженные частицы и нейтроны, образованные вследствие развития электромагнитных каскадов в совокупности с фотоядерными реакциями в остаточном воздухе вакуумных камер накопительного кольца синхротрона, а также на его конструктивных элементах и в веществе биологической защиты. Моделирование радиационных полей, возникающих при работе синхротрона, выполнялось методом Монте-Карло с помощью программного пакета GEANT4. Для моделирования объектов сложной геометрической формы использовалась техника CADMesh [1]. Приводятся результаты для мощности эффективной дозы с распределением вкладов по вторичным частицам, а также для угловых и спектральных распределений излучения. Данные по мощности эффективной дозы и мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) получены на основе расчета плотности потока и переходных коэффициентов, приведенных в 119 Публикации ICRP [2] и статье Pelliccioni и др. [3]

Расчетами показано, что внутри линии вывода СИ при токе 700 мА мощность дозы составляет до 0,1 Зв/час на оси пучка, при этом основным дозообразующим излучением являются гамма-кванты, а вклад остальных излучений не превышает 1%. Угловое распределение тормозного и вторичного излучения в зоне вывода СИ резко анизотропное. Характерный угол, содержащий 50% излучения, оценивается величиной 0,0049 град.

Внутри канала ускорителя при токе пучка 700 мА МАЭД за счет тормозного излучения на остаточном воздухе составляет не более  $10^{-5}$  мкЗв/час. Вблизи скраперов при ожидаемом уровне потерь  $10^{-14}$  на электрон (80% суммарных потерь пучка) мощность дозы внутри канала достигает 3 мкЗв/час, из которых 75% обеспечивается вкладом нейтронов. При этом поле вокруг скреперов локализовано зоной  $\pm 3$  м (по уровню 10% от максимума).

Конструкция защитных сооружений канала, используемая для ускорителя ESRF и состоящая из вольфрамового поглотителя толщиной 10 см и бетонной стены толщиной 0,5 м со свинцовой накладкой толщиной 1 см, оказывается недостаточной для ускорителя СИЛА. При использовании тока пучка величиной 700 мА увеличение толщины бетонной защиты до 1,25 м обеспечивает мощность эффективной дозы за окончанием линии вывода СИ не выше 0,06 мкЗв/ч.

Расчетами установлено, что за пределами канала накопительного кольца вблизи скрапера основным дозообразующим излучением являются нейтроны, а вклад остальных излучений составляет не более 1%. При этом локальная защита из стали толщиной 0,75 м в совокупности со стеной из свинца толщиной 10 см и бетона толщиной 2 м обеспечивает при токе до 700 мА МАЭД не выше 0,12 мкЗв/ч.

### *Список литературы*

1. Poole P. et al. A CAD interface for GEANT4. 2017.
2. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
3. Pelliccioni M., Roesler S. Fluence-to-Effective Dose and Fluence-to-Ambient Dose Equivalent conversion coefficients for high-energy radiation calculated using the FLUKA Code // CERN, Geneva. – 2008.

Н.В. МАРКОВ, А.А. АРТЮХОВ, В.А. ЗАГРЯДСКИЙ, А.В. КОЗЛОВ, Т.В. КУЛЕВОЙ,  
К.В. ПАВЛОВ, И.И. СКОБЕЛИН, В.С. СТОЛБУНОВ, Ю.Е. ТИТАРЕНКО  
*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ И-2 В ОБЛАСТИ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрены возможные области применения линейного ускорителя протонов И-2 с энергией протонов 24 МэВ. Ключевые направления исследований сосредоточены в области облучения электронно-компонентной базы, наработки различных типов радиоактивных изотопов, а также в области создания источника нейтронов. Проведены экспериментальные и аналитические оценки возможности получения медицинских радиоизотопов на примере изотопа йод-123. Представлены результаты экспериментальных исследований по генерации нейтронов с помощью бериллиевой мишени полного поглощения.

N.V. MARKOV, A.A. ARTYUKHOV, V.A. ZAGRYADSKII, A.V. KOZLOV, T.V. KULEVOY,  
K.V. PAVLOV, I.I. SKOBELIN, V.S. STOLBUNOV, Yu.E. TITARENKO  
*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## THE USE OF THE PROTON LINEAR ACCELERATOR I-2 IN THE FIELD OF APPLIED RESEARCH

Possible areas of application of the I-2 linear proton accelerator with a proton energy of 24 MeV are considered. The main research areas are focused in the field of irradiation of the electronic component base, production of various types of radioactive isotopes, as well as in the field of implementation as a neutron source. Experimental and analytical assessments of the possibility of obtaining medical radioisotopes were carried out based on the production of the iodine-123 isotope. The results of experimental studies on neutron generation by using a full absorption beryllium target are presented.

В настоящее время на площадке Курчатовского комплекса теоретической и экспериментальной физики работает линейный ускоритель протонов И-2, который изначально использовался в качестве источника для протонного синхротрона У-10. Линейный ускоритель оснащен несколькими выводными каналами пучка, на которых возможно проведение исследований в различных прикладных областях, таких как исследование радиационной стойкости электронно-компонентной базы и материаловедение.

Следует отметить, что использование ускорителя протонов И-2 для облучения электронно-компонентной базы на сегодняшний день является уже рутинной процедурой, и здесь помимо изучения радиационной стойкости установка также применяется для радиационного технологического облучения элементов силовой полупроводниковой. При этом значения энергии пучка, выведенного в атмосферу, а также среднего тока пучка, позволяют рассматривать данный ускоритель как потенциальную исследовательскую установку для усовершенствования существующих и разработки новых методов получения медицинских радиоизотопов. В качестве первого шага в данном направлении, совместно со специалистами Курчатовского комплекса физико-химических технологий были проведены экспериментальные исследования по получению на линейном ускорителе И-2 радиоактивного изотопа I-123. В рамках описываемых исследований с использованием газовой мишени, содержащей Хе-124 было получено  $8,11 \times 10^6$  Бк изотопа I-123. В дальнейшем, используя аналитические методики [1] была проведена оценка максимально возможных объемов получаемых активностей данного изотопа при проведении облучения на ускорителе И-2.

Другое интересное направление исследований на линейном ускорителе И-2 связано с развитием исследований в области создания компактных источников нейтронов на базе ускорителей заряженных частиц. В частности, в настоящее время активно развивается проект DARIA (источник нейтронов, предназначенный для прикладных и промышленных исследований), направленный на разработку компактных генераторов нейтронов для университетов, научных центров и промышленности. В основе подобных установок лежат реакции образования нейтронов при облучении заряженными частицами (протонами или дейтронами) мишеней из бериллия или лития. В контексте развития данного направления ускоритель протонов И-2 можно рассматривать в качестве экспериментальной площадки как для отработки технологий изготовления нейтрон-генерирующих мишеней, так и для отработки методик диагностики нейтронов. С этой целью был создан экспериментальный стенд для проведения тестовых измерений потоков нейтронов, образующихся при взаимодействии протонов с нейтрон-генерирующей мишенью на основе бериллия. На базе созданного стенда были проведены серии экспериментов по определению выхода нейтронов, при облучении бериллиевой мишени протонами с начальной энергией 24,6 МэВ. Полученное значение  $(7,0 \pm 0,6) \times 10^{-4}$  нейтронов [2], вылетающих из мишени, в нормировке на исходный протон, достаточно хорошо согласуется с результатами моделирования.

### Список литературы

1. Загрядский В.А., Маламут Т.Ю., Меньшиков Л.И. и др. // Атомная энергия, Т. 131, Вых. 84-89,
2. Ю.Е. Титаренко, В.Ф. Батяев, В.Ю. Бландинский и др. // Ядерная физика N 6 vol. 85 388-396.

В.А. КИСЕЛЕВ, А.П. ЧЕРНЯЕВ, Ю.Д. УДАЛОВ, М.А. БЕЛИХИН,  
А.М. ДЕМИДОВА, С.Е. ГРИЦЕНКО

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научно-клинический центр медицинской радиологии и онкологии» Федерального медико-биологического агентства, Дмитровград, Россия*  
*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*  
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия*

## **АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ОТКЛОНЕНИЯ КООРДИНАТ УЗКИХ ПУЧКОВ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА КЛИНИЧЕСКИХ ПЛАНОВ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ**

Рассмотрено влияние случайной погрешности положения узкого протонного пучка на основные характеристики клинических лечебных планов при проведении протонной терапии. Проведено моделирование случайной ошибки координат узкого пучка в 12 планах протонной терапии, расчет дозиметрических планов с внесенной случайной ошибкой и сравнение их с изначальными планами по ряду параметров.

V.A. KISELEV, A.P. CHERNYAEV, Yu.D. UDALOV, M.A. BELIKHIN,  
A.M. DEMIDOVA, S.E. GRITSENKO

*FSBI «Federal Scientific Clinical Center for Medical Radiology and Oncology» of FMBA of Russia, Dimitrovgrad, Russia*  
*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*  
*P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## **ANALYSIS OF NARROW BEAM COORDINATES DEVIATIONS SIGNIFICANCE ON THE QUALITY OF PROTON THERAPY CLINICAL PLANS**

The influence of a random error in the position of a narrow proton beam on the main characteristics of clinical treatment plans during proton therapy is considered. A random error in narrow beam coordinates was modeled in 12 proton therapy plans, dosimetric plans with introduced random error were calculated, and they were compared with the original plans for a number of parameters.

Методика протонной терапии сканирующим тонким пучком является одним из наиболее современных подходов в формировании конформного (совпадающего по форме с опухолью) дозового распределения в облучаемой мишени в теле пациента. Дозовое распределение высокой конформности достигается за счет оптимизации тысяч элементарных тонких пучков протонного излучения. К точности доставки каждого отдельного тонкого пучка предъявляются высокие требования с целью недопущения клинически значимых ошибок [1]. На качество клинического плана протонной терапии могут оказывать влияние как количество ошибочно доставленных узких пучков [2,3], так и девиации в поперечном размере узкого пучка [4].

После создания индивидуального плана протонной терапии в системе дозиметрического планирования (СДП) Pinnacle<sup>3</sup> 16.2 возможен экспорт файлов, содержащих данные о положении и дозовом вкладе каждого спота на всех значениях энергии в текстовом формате. Существует возможность ручного изменения указанных с помощью текстового редактора значений и импорт измененных файлов в СДП.

Вносились изменения, соответствующие случайной ошибке в положении спотов в ортогональных направлениях X и Y (0 мм,  $\pm 1$  мм,  $\pm 2$  мм). Изменения были внесены в 12 планов пациентов с опухолями, расположенными в головном мозге, в области головы и шеи, в области молочной железы и в области предстательной железы. Для каждого из получившихся планов с внесенной ошибкой было проведено сравнение гипотетического дозного распределения в СДП с распределением исходного плана. Сравнивалось значение максимальной дозы в теле пациента, минимальной дозы в планируемом объеме облучения (PTV), медианной дозы в PTV, объем PTV покрытый 98% от предписанной дозы, объем PTV покрытый 95% от предписанной дозы, а также дозовые характеристики прилегающих здоровых органов.

Случайные ошибки  $\pm 1$  мм и  $\pm 2$  мм положения тонких пучков в протонной терапии оказывают влияние на качество лечебного плана. Степень изменения качества дозиметрических параметров плана пропорциональна значению случайных ошибок. Наибольшие изменения происходили в планах со случайной ошибкой  $\pm 2$  мм. Планы предстательной железы и головного мозга показали наибольшее повышение максимальной дозы в теле пациента и снижение покрытия PTV предписанной дозой. Прилегающие здоровые органы в случаях предстательной железы и молочной железы наименее страдают от случайных ошибок положения тонких пучков в лечебных полях. Дальнейшее исследование планируется посвятить воспроизведению действительного дозного распределения лечебного плана на основе анализа log-файлов системы протонной терапии.

### *Список литературы*

1. Arjomandy B., Taylor P., Ainsley C., et al. // Med. Phys. 2019. V46, № 8. P. 678–705.
2. Yu J., Beltran C.J. and Herman M.G. // Med. Phys. 2014. Vol. 41, № 8.
3. Arjunan M, Krishnan G, Sharma D.S., et al. // Br. J. Radiol. 2021. Vol. 94, № 2.
4. Rana S. and Rosenfeld A.B. // J. Appl. Clin. Med. Phys. 2021. Vol. 22, № 7. P. 147-154.

А.С. САРИМСАКОВ, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН,  
Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ТИПР

В Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККТЭФ) проектируется двухпучковая установка (5,6 МэВ  $Fe^{2+}$  + 300 кэВ  $He^{+}$ ) на базе ускорителя тяжелых ионов ТИПр для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах. Одновременное облучение двумя пучками на изучаемый материал будет производиться в мишенной камере. Для диагностики пучков в мишенной камере необходимо разработать цилиндр Фарадея. В работе представлена конструкция цилиндра Фарадея.

A.S. SARIMSAKOV, P.A. FEDIN, A.V. KOZLOV, V.K. SEMYACHKIN,  
R.P. KUIBEDA, T.V. KULEVOY

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## BEAM INTENSITY SENSOR DEVELOPMENT FOR HIPR ACCELERATOR

The two-beam facility (5.6 MeV  $Fe^{2+}$  + 300 keV  $He^{+}$ ) based on the HIPr accelerator is being designed at the Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics (KCTEP) to simulate radiation damage in steels and alloys. Simultaneous irradiation with two beams will be performed in a target chamber. Faraday cup is developed to measure the beams in the target chamber. The report presents the Faraday cup design.

Проект двухпучковой установки на основе линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр направлен на обеспечение возможности имплантировать ионы  $He^{+}$  в образец одновременно с облучением тяжелыми ионами [1]. Данный комплекс позволит моделировать не только радиационные повреждения в структуре конструкционных материалов ядерных реакторов пучками тяжелых ионов, но и моделировать накопление продуктов ядерных реакций в местах повреждений. В ККТЭФ разработана и изготовлена мишенная камера для экспериментов с облучением. В камере элементы диагностической системы размещены на оси каждого из пучков. Предполагается использование цилиндра Фарадея (ЦФ) для измерения пучка диаметром не более 40 мм и расходимостью не более 100 мрад. С помощью ЦФ планируется измерять пучок ионов  $Fe^{2+}$  с энергией 5,6 МэВ и пучок  $He^{+}$  с энергией до 300 кэВ с током каждого пучка до 5 мА, с длительностью импульса 500 мкс, с периодом повторения 1 с.

Представлена на обсуждение полномасштабная конструкция макета ЦФ (рис.1). Датчик состоит из внешнего экрана (1), токоприемника (2) и электрода супрессора (3).

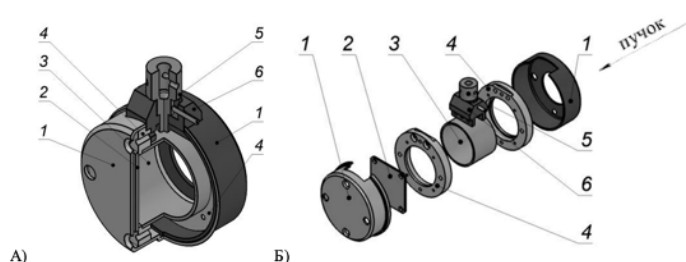


Рис. 1. Конструкция цилиндра Фарадея А) в сборе с вырезом; Б) с разнесенным видом.

1 – экран; 2 – токоприемник; 3 – электрод-супрессор 4 – керамические фланцы; 5 – серьга; 6 – скоба.

Экран (1) защищает от различных вторичных заряженных частиц, не относящихся к измеряемому пучку, а также прикрывает электрод-супрессор от сильно расходящихся траекторий измеряемого пучка. Токоприемник (2) поглощает попавший на него ионный пучок. На электрод-супрессор (3) подается потенциал -500 В для экранирования от вторичных электронов с токоприемника. Для электрической изоляции токоприемника (2), электрода-супрессора (3) и экрана (1) используются керамические фланцы (4). С помощью серьги (5) и скобы (6) ЦФ крепится к подвижному штоку. По краям скобы находятся отверстия для юстировки ЦФ поперечно ионному пучку. На видимой цилиндрической поверхности серьги есть отверстия для винтов, которые служат для фиксации со штоком.

### Список литературы

1. Fedin P.A. and others // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 1686 012073

Д.Л. ЛОГВИНОВ, П.А. ФЕДИН, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН, Р.П. КУЙБИДА,  
Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## РАЗРАБОТКА РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ПИТАНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЫ УСКОРТЕЛЯ ТИПР

В Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККТЭФ) проектируется двухпучковая установка ( $5,6 \text{ MeV Fe}^{2+} + 300 \text{ keV He}^+$ ) на базе ускорителя тяжелых ионов ТИПр для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах. Ионный источник ионов гелия и система транспортировки до ускорительной трубки установлены на платформе под напряжением до 300 кВ. Для электропитания высокоплотной платформы разрабатывается разделительный трансформатор мощностью 10 кВт. В работе представлен проект разделительного трансформатора.

D.L. LOGVINOV, P.A. FEDIN, AV. KOZLOV, V.K. SEMYACHKIN, R.P. KUIBEDA, T.V.  
KULEVOY

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## ISOLATION TRANSFORMER DEVELOPMENT FOR HIGH-VOLTAGE HIPR ACCELERATOR PLATFORM

A two-beam facility ( $5.6 \text{ MeV Fe}^{2+} + 300 \text{ keV He}^+$ ) based on the HIPr heavy ion accelerator for modeling radiation damage in steels and alloys is being designed at the Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics (KCTEP). A helium ion source and a transport system to the accelerator tube are installed on a platform with a voltage of up to 300 kV. A 10 kW isolation transformer is being developed for the power supply of a high-voltage platform. The work presents a design of the isolation transformer.

Проект двухпучковой установки на основе линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр направлен на обеспечение возможности имплантировать ионы  $\text{He}^+$  в образец одновременно с облучением тяжелыми ионами [1]. Данный комплекс позволит моделировать не только радиационные повреждения в структуре конструкционных материалов ядерных реакторов пучками тяжелых ионов, но и моделировать накопление продуктов ядерных реакций в местах повреждений. В рамках данного проекта создается канал ускорения легких ионов (H и He) на основе высоковольтной платформы, где размещается источник данных ионов. Оборудование на высоковольтной платформе установки требует наличия электрической однофазной сети 220 В 50 Гц мощностью не менее 10 кВт. Для обеспечения гальванической развязки и обеспечения изоляции 300 кВ между высоковольтной платформой и сетью питания требуется разработать разделительный трансформатор. В работе представлена на обсуждение полномасштабная конструкция разделительного трансформатора (рис. 1). Конструкция представляет собой каскад из трех малых разделительных трансформаторов, каждый из которых обеспечивает гальваническую развязку и изоляцию на 100 кВ. Малые трансформаторы располагаются на трех платформах. Средняя и верхняя платформы установлены на высоковольтных изоляторах и имеют внутренние и внешние обтекатели. На каждой из платформ установлено по 12 магнитопроводов входящих в состав одного малого трансформатора. Первичные обмотки которого, намотанные на каждом магнитопроводе, подключены между собой параллельно. Вторичная обмотка выполнена из высоковольтного кабеля с изоляцией на 100 кВ.

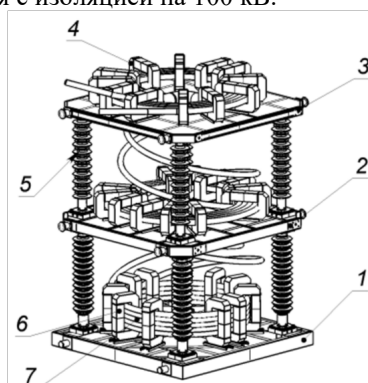


Рис. 1: 3D-модель разделительного трансформатора (1-нижняя платформа, 2-средняя платформа, 3-верхняя платформа, 4-магнитопровод, 5-высоковольтный изолятор, 6-первичная обмотка, 7-вторичная обмотка)

### Список литературы

1. Fedin P.A. and others // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 1686 012073



В. ГАСЫМОВ<sup>1,3</sup>, С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>, А. АКСЕНТЬЕВ<sup>1,2,3</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия,

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

## ПОДАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ НА ПРЯМЫХ УЧАСТКАХ В РАМКАХ ЗАДАЧИ ПО МОДЕРНИЗАЦИИ НУКЛОТРОНА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОИСКА ЭДМ

В рамках программы по модернизации Нуклотрона (ОИЯИ) рассматривается возможность использовать его в целях поиска ЭДМ дейтрона. Для этого необходимо решить две проблемы: во-первых, увеличить длины прямых участков для установки оборудования, нужного для осуществления состояния спиновой замороженности пучка; во-вторых, нужно подавить дисперсию на прямых участках. В настоящей работе решается вторая задача.

V. GASYMOV<sup>1,3</sup>, S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>, A. AKSENTYEV<sup>1,2,3</sup>, Yu. SENICHEV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,

<sup>3</sup>National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

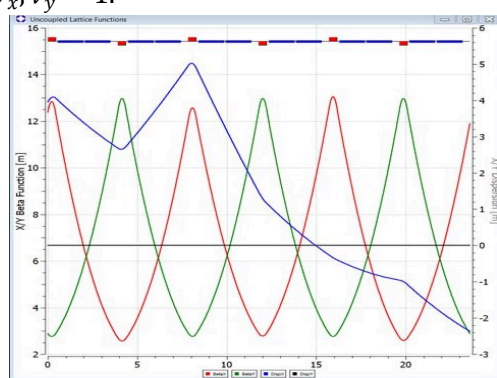
<sup>4</sup>Institute for Theoretical Physics. L.D. Landau, Chernogolovka, Russia

## STRAIGHT SECTION DISPERSION DAMPING IN THE NUCLOTRON AS PART OF ITS MODERNIZATION EFFORT TO SEARCH FOR THE EDM

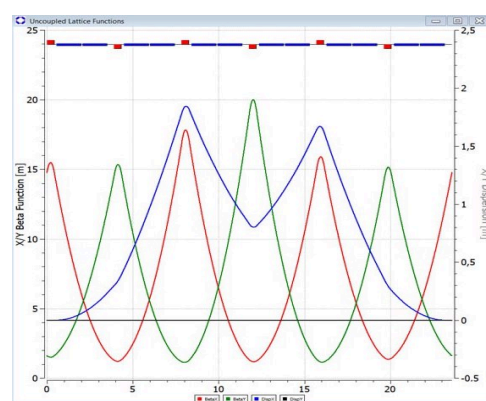
As part of the modernization effort of the Nuclotron (JINR) the prospect of using it for searching for the deuteron EDM is being considered. In order to use it for that purpose, two problems have to be solved: first, the lengths of the straight sections have to be increased so as to accommodate the equipment required for establishing the “frozen spin” state. Secondly, dispersion on the straight sections has to be zeroed. The present work deals with the second task.

В настоящий момент рассматриваются возможности модернизации Нуклотрона (ОИЯИ). Одной из задач, направляющих проект модернизации, выступает поиск электрического дипольного момента, в частности дейтрона. На прямых участках Нуклотрона можно разместить оборудование для осуществления состояния спиновой замороженности пучка; однако для этого требуется решить две задачи: (1) увеличить длины прямых участков октантов, и (2) подавить дисперсионную функцию на этих участках.

Выполнить первую задачу возможно путём увеличения магнитных полей в арках до необходимых значений, технически предельно-допустимая величина в 1.8 Т для решения задач иного рода. Подавление дисперсии на границах прямых участков осуществляется путём настройки набегу бетатронных фаз в квадрупольных линзах. В ходе настройки получены нормализованные частоты бетатронных колебаний  $\nu_x, \nu_y = 1$ .



а)



б)

Рис. 1. а) Твисс-функции в начале оптимизации. Дисперсия на краях арок отлична от нуля;

б) Твисс-функции после оптимизации. Дисперсия по краям арок подавлена.

### Список литературы

1. J. Wei, S.-Y. Lee, Space Charge Effect at Transition Energy and the Transfer of R.F. System at Top Energy, BNL—41667
2. Е. М. Сыресин и др. Формирование поляризованных протонных пучков в ускорительном комплексе NICA, 2021, ЭЧАЯ Т. 52, Вып. 5, С. 1305-1341, <https://doi.org/10.1134/S1063779621050051>
3. Yu. V. Senicheva and A. N. Checheninb, Construction of “Resonant” Magneto-Optical Lattices with Controlled Momentum Compaction Factor

## РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ПУЧКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ФОТОИНЖЕКТОРАХ В РАЗЛИЧНЫХ ПРОГРАММАХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены результаты численного моделирования динамики пучка заряженных частиц в фотоинжекторах электронов: 1,6 ячеечный с частотой 2,45 ГГц и 3,6 ячеечный с частотой 2,8 ГГц в двух средах численного моделирования – ASTRA и CST при различных конфигурациях начального распределения частиц. Проведен анализ полученных выходных данных.

A.B. ERSHOV, N.Yu. SAMAROKOV, V.I. RASHCHIKOV, M.V. LALAYAN  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CHARGED PARTICLES BEAM DYNAMICS SIMULATION IN PHOTO INJECTORS BY VARIOUS NUMERICAL CODES

The results of the charged particles beam dynamics simulation in electron photoinjectors are considered. Two photoguns 1.6 cell with a frequency of 2.45 GHz and 3.6 cell with a frequency of 2.8 GHz by means of two numerical simulation codes, ASTRA and CST, with different configurations of the initial particles distribution investigated. The obtained output data are discussed.

СВЧ фотопушки применяются в современных источниках синхротронного излучения, коллайдерах, лазерах на свободных электронах (ЛСЭ) и плазменных ускорителях [1, 2]. В работе представлены результаты численного моделирования фотопушек в различных программах: ASTRA и CST. При расчетах использовались различные начальные распределения частиц, создаваемые в подпрограмме ASTRA Generator, и затем импортировались в каждую из программ [3 – 5]. Распределения электрического и магнитного поля (при расчетах с учетом магнитов) были предварительно получены и импортированы в программы. Важно отметить различие сеток в ASTRA и CST: в первой сетка подстраивается автоматически под размер пучка, тогда как во второй программе задается фиксировано. На рисунке 1 представлены результаты моделирования фотопушки с частотой 2,45 ГГц с одним из вариантов распределения частиц.

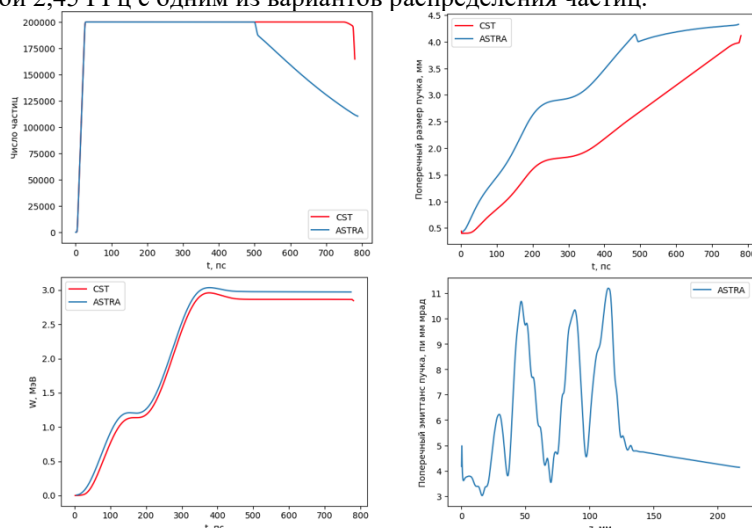


Рис. 1. Сравнение результатов численного моделирования в различных программах численного моделирования. Расхождение полученных результатов может быть связано со следующим: разница в методиках численного моделирования динамики пучка, различие сеток при расчетах. Это говорит о необходимости детального анализа параметров используемой численной модели.

### Список литературы

1. Alesini D. et al. New technology based on clamping for high gradient radio frequency photogun //Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. – 2015. – Т. 18. – №. 9. – С. 092001.
2. M. Krasilnikov, S. M. Polozov, and V. I. Rashchikov An improved model for photoemission of space charge dominated picosecond electron bunches: theory and experiment, IPAC2021, Campinas, SP, Brazil JACoW Publishing, doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-WEPAB101
3. Chen Y. et al. 3D full electromagnetic beam dynamics simulations of the PITZ photoinjector //IPAC. – 2014. – Т. 14. – С. 391.
4. Krasilnikov M. et al. Experimentally minimized beam emittance from an L-band photoinjector //Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams. – 2012. – Т. 15. – №. 10. – С. 100701.
5. Li J. et al. Emission studies of photocathode RF gun at PITZ //Proc of ICAP2012, Rostock-Warnemunde, Germany. – 2012.

К.А. КАРАВАЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ДИНАМИКА ПУЧКА ИОНОВ $\text{Xe}^{28+}$ В ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА NICA**

Проведена настройка ускоряющей структуры и моделирование динамики ионов  $\text{Xe}^{28+}$  в линейном ускорителе тяжелых ионов (ЛУТИ) инжекционного комплекса NICA [1, 2, 3, 4]. Проведено исследование селективности ускорения ионов Хе нецелевых зарядностей в ЛУТИ

К.А. KARAVAEV

*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **$\text{Xe}^{28+}$ ION BEAM DYNAMICS INVESTIGATION IN THE HEAVY ION LINEAR ACCELERATOR OF THE NICA INJECTION COMPLEX**

The accelerating structure was adjusted and the dynamics of  $\text{Xe}^{28+}$  ions was simulated in the heavy ion linear accelerator (HiLAC) of the NICA injection complex [1, 2, 3, 4]. A study of the selectivity of acceleration of Xe ions of non-target charges in HiLAC was carried out

Линейный ускоритель тяжелых ионов (ЛУТИ) ЛФВЭ ОИЯИ предназначен для ускорения ионов золота  $\text{Au}^{32+}$ , но в этой же структуре может осуществляться ускорение и других заряженных частиц с  $A/Z \leq 6/35$ . В частности, для пучка ионов  $\text{Xe}^{28+}$  с конечной кинетической энергией 396.8 МэВ необходимо подобрать параметры ускоряющего и магнитного полей так, чтобы обеспечить максимальный коэффициент токопрохождения.

Для оптимизации было проведено моделирование ускоряющей структуры в программе TraceWin [5] и получены необходимые значения энергии пучка и высокий коэффициент токопрохождения. Процесс оптимизации проводился при помощи встроенной функции ADJUST, позволяющей в автоматическом режиме (итерационно) осуществить подбор оптимальных параметров различных элементов ускорителя.

На выходе источника ионов, кроме целевой зарядности частиц, обязательно будут получены и другие. Ускорительный комплекс настроен лишь на ионы с определенным отношением заряда к массе, поэтому важно обеспечить их наиболее эффективное разделение. Было проведено исследование селективности ускорения нецелевых ионов Хе в ЛУТИ. Полученные результаты свидетельствуют о значительном коэффициенте токопрохождения ионов  $\text{Xe}^{28+}$ ,  $\text{Xe}^{27+}$  (97.68% и 93.61% соответственно), незначительном прохождении ионов  $\text{Xe}^{29+}$  (14.98%) и полном отсечении других.

### *Список литературы*

1. A. Butenko et al., Beams of  $4\text{He}^{+}$  acceleration by Heavy Ion Linear Accelerator and injection into Booster of NICA project during its first run, Dubna.
2. D. Mäder, Alignment and Measurements of HiLAC IH1 Cavity, Frankfurt am Main, 2015
3. D. Mäder, Alignment and Measurements of HiLAC IH2 Cavity, Frankfurt am Main, 2015
4. B. Koubek, Assembly and RF Setup of the RFQ at Frankfurt University, Frankfurt am Main, 2014
5. TraceWin Manual, France, Dec. 2021; <https://irfu.cea.fr/dacm/logiciels/codesdacm/tracewin/tracewin.pdf>

С. КОЛОКОЛЬЧИКОВ<sup>1,2</sup>, Ю. СЕНИЧЕВ<sup>1,2</sup>, В. КАЛИЛИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Иститут Ядерных Исследований РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт, Долгопрудный,

<sup>3</sup>Институт физики высоких энергий, Протвино.

## ПРОХОЖДЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ГАРМОНИЧЕСКОМ ВЧ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА У-70

Данная работа посвящена исследованию прохождения критической энергии в гармоническом ВЧ. С этой целью в работе приведены экспериментальные данные сеанса на синхротроне У-70, где осуществляется прохождение критической энергии методом быстрого изменения критической энергии в гармоническом ВЧ. Также изучено прохождение без создания дополнительного скачка.

S. KOLOKOLCHIKOV<sup>1,2</sup>, Yu.SENICHEV<sup>1,2</sup>, V. KALININ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia,

<sup>3</sup>Institute for High Energy Physics, Protvino, Russia.

## TRANSITION ENERGY CROSSING IN HARMONIC RF AT PROTON SYNCHROTRON U-70

This work is devoted to the study of the passage of the transition energy in harmonic RF. For this purpose, the paper presents experimental data of a session on the synchrotron U-70, where the crossing of transition energy is carried out by the method of rapid change of transition energy in harmonic RF. Also considered crossing without an additional jump.

Проблема прохождения критической энергии в синхротроне NICA г. Дубна актуальна для экспериментов с протонами на энергии 13 ГэВ. Для экспериментов с тяжелыми ионами на энергии 4,5 ГэВ такой сложности не возникает, так как критическая энергия  $\sim 5,7$  ГэВ. NICA оснащена различными ВЧ станциями: барьерной ВЧ-1 и гармоническими ВЧ-2, ВЧ-3. С этой целью исследовано прохождение критической энергии на синхротроне У-70.

С целью сохранения стабильности продольного движения на У-70 используется метод скачка критической энергии, что показано на Рис. 1. [1, 2] Такой скачок достигается путем модуляции дисперсионной функции, расположением дополнительных квадруполей во 2-ом и 8-ом блоках каждого суперпериода. расположены на через полпериода  $\Delta v_{x,y} = 0.5 \times 0.5$  и имеют противоположные полярности. [3] При такой модуляции, скачок критической энергии происходит без существенного сдвига бетатронных частот.

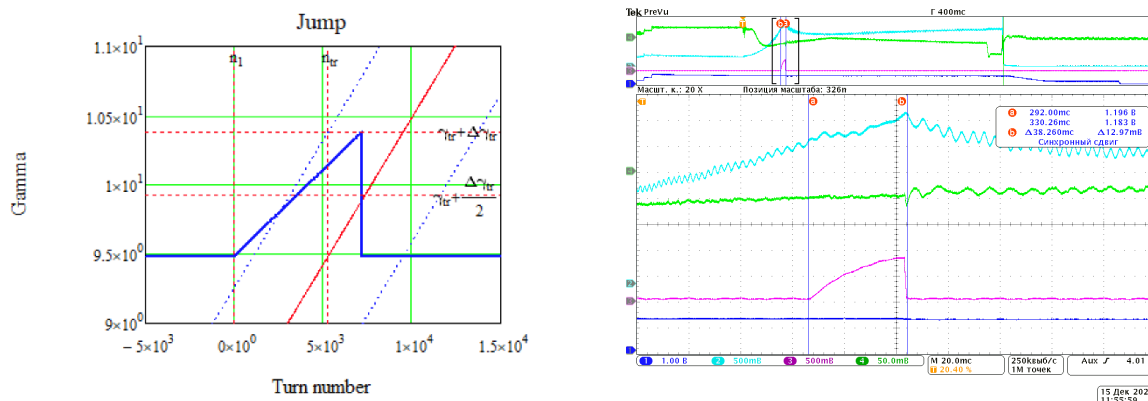


Рис. 1. а) Принципиальная схема скачка критической энергии У-70; б) Скачок критической энергии в У-70, сигнал с фазового датчика, фиолетовая – скачок градиента в дополнительных квадруполях, голубая – сигнал с пикового детектора.

Показано, что темп пересечения критической энергии является ключевым фактором для обеспечения стабильности. Полученные результаты представляют большой интерес для дальнейшего изучения критической энергии как в гармоническом, так и барьерном ВЧ в коллайдере NICA для ускорения поляризованных протонов до 13 ГэВ.

### Список литературы

1. J. Wei, S.-Y. Lee, Space Charge Effect at Transition Energy and the Transfer of R.F. System at Top Energy, BNL—41667
2. S.-Y. Lee, Accelerator Physics (Fourth Edition), DOI:10.1142/111111, ISBN: 978-981-327-468-6, 978-981-327-467-9, World Scientific Publishing Company, 2018.
3. Пашков, П. Т, Основы теории протонного синхротрона: Учеб. пособие для студентов МГУ / П. Т. Пашков. - Протвино: Гос. науч. центр Рос. Федерации Ин-т физики высок. энергий, 1999. - 112 с.:- (Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий (ИФВЭ); 99-42. ОУ У-70).

В.С. ДЮБКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВНЕ ОСЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ ДЛЯ НАКОПИТЕЛЬНОГО СИНХРОТРОНА 4-ГО ПОКОЛЕНИЯ СИЛА

Рассмотрен вариант вне осевой инжекции электронных сгустков при полной энергии 6 ГэВ из линейного ускорителя-драйвера в накопительный синхротрон 4-го поколения «СИЛА», разрабатываемого на базе НИЦ «Курчатовский институт». Определены основные параметры кикер-магнитов, обеспечивающие 100% эффективность инжекции.

V.S. DYUBKOV

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OFF-AXIS INJECTION SIMULATION FOR THE 4TH GENERATION SYNCHROTRON SYLA

Off-axis top-up injection of 6 GeV electron bunches from a linear accelerator driver into SYLA – the 4th generation storage synchrotron, that is under development at the National Research Center Kurchatov Institute, is considered. The main parameters of kicker magnets that ensure 100% injection efficiency have been determined.

Одной из мега-сайенс установок Российской Федерации согласно Федеральной научно-технической программе развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы станет источник синхротронного излучения 4-го поколения на базе накопительного электронного синхротрона на энергию 6 ГэВ и лазера на свободных электронах на основе «тёплого» линейного ускорителя, который будет использоваться и как инжектор электронов для накопительного синхротрона с частотой 100 Гц [1-3]. Требование к схеме инжекции состоит в том, чтобы свести к минимуму пространство, отведенное для её компонентов, которое в противном случае может быть использовано для вывода синхротронного излучения. Выполнено моделирование процесса многооборотной инжекции с помощью инжекционной системы состоящей из септум и четырёх кикер магнитов. Инжекция электронов с энергией 6 ГэВ предъявляет жёсткие требования к импульсным септум и кикер магнитам.

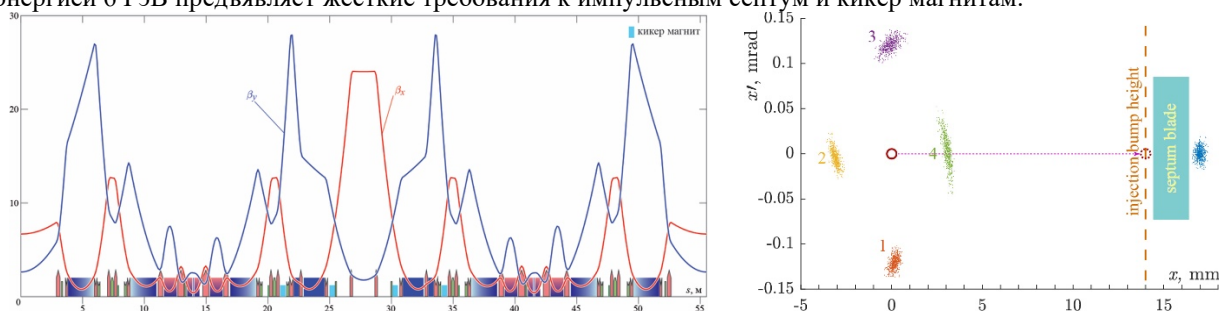


Рис. 1. Инжекционные периоды и фазовые портреты инжектируемого пучков (первые четыре прохода периметра накопителя).

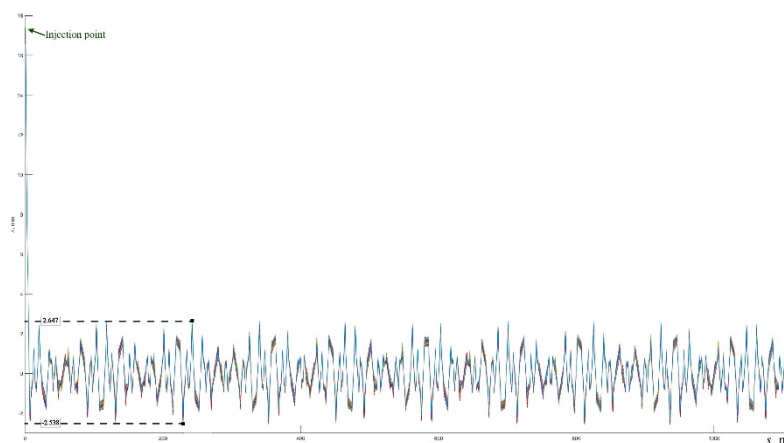


Рис. 2. Траектории электронов инжектированного пучка на при инжекции вдоль периметра накопителя СИЛА.

### Список литературы

1. Liuzzo S.M. et al. // Proc. 12th IPAC, May 2021, Online, Brazil. TUPAB049.
2. Dyubkov V.S. // Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 12, pp. 2703–2710.
3. Ковальчук М.В. и др. // Кристаллография, 2022, Т. 67, вып. 5. С. 726-734.

П.А. ФЕДИН, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ, А.В. ЗИЯТДИНОВА, А.В. КОЗЛОВ, В.К. СЕМЯЧКИН,  
Р.П. КУЙБИДА, Т.В. КУЛЕВОЙ  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ПРОЕКТ ДВУХПУЧКОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЯ ТИПР ДЛЯ ИМИТАЦИИ НЕЙТРОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Под действием нейтронов в конструкционных материалах ядерных установок возникают дефекты кристаллической решетки и происходит накопление продуктов трансмутации (гелия и водорода) в структуре материала. В Курчатовском Комплексе Теоретической и Экспериментальной Физики (ККТЭФ) ускоритель тяжелых ионов ТИПр (тяжело-ионный прототип) используется для моделирования радиационных повреждений в сталях и сплавах с помощью пучка ионов  $\text{Fe}^{2+}$  5,6 МэВ. Для одновременной имплантации гелия (или водорода) в область дефектов проектируется высоковольтная платформа, которая обеспечит ускорение пучка ионов гелия до энергии 300 кэВ. В докладе представлено описание проектируемой установки.

P.A. FEDIN, K.E. PRYANISHNIKOV, A.V. ZIATDINOVA, A.V. KOZLOV, V.K. SEMYACHKIN,  
R.P. KUIBEDA, T.V. KULEVOY  
NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## THE TWO-BEAM FACILITY DESIGN BASED ON THE HIPR ACCELERATOR FOR SIMULATING NEUTRON INFLUENCE

Defects in the crystal lattice arise and the accumulation of transmutation products (helium and hydrogen) occurs in the structure of the material under the action of neutrons in the structural materials of nuclear facilities. At Kurchatov Complex for Theoretical and Experimental Physics the heavy ion accelerator HIPr (heavy ion prototype) is used to simulate radiation damage in steels and alloys using a 5.6 MeV  $\text{Fe}^{2+}$  ion beam. The high-voltage platform is designed to simultaneously implant helium (or hydrogen) into the region of defects. The high-voltage platform will provide a beam of helium ions with energy up to 300 keV. The report is dedicated to description of the design facility.

В ККТЭФ проводятся имитационные эксперименты по облучению пучками тяжелых ионов на ускорителе ТИПр. Ускоритель работает с длительностью импульса 475 мкс, с частотой повторения один импульс в 2 секунды. В качестве ионного источника используется вакуумно-дуговой источник ионов металлов (ВДИИМ). На ускорителе ТИПр ионы  $\text{Fe}^{2+}$  достигают энергии 101 кэВ/нуклон в структуре RFQ. На рис. 1 представлена схема ускорителя ТИПр, проектируемой высоковольтной платформы и канала транспортировки [1]. В качестве источника ионов гелия или водорода планируется использовать ЭЦР источник [2], расположенный на высоковольтной платформе до 300 кВ. Пучок ионов гелия должен повторять импульсный режим работы пучка железа. На высоковольтной платформе располагаются элементы транспортировки пучка: импульсный соленоид, поворотный магнит, триплет квадрупольных линз. В канале после ускорительной трубки устанавливаются два дублета квадрупольных линз. Пучки сходятся в мишенной камере под углом  $30^\circ$  [3]. Электропитание на высоковольтной платформе осуществляется через разделительный трансформатор.

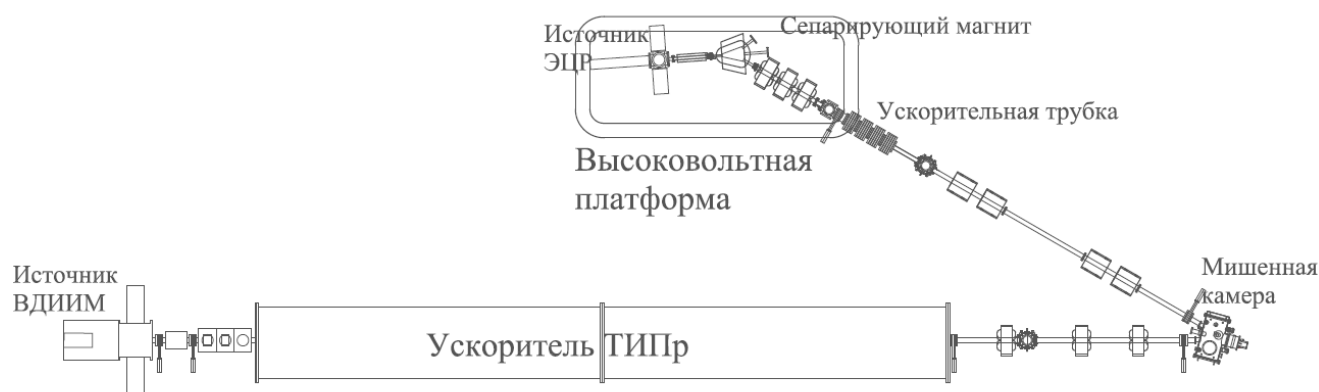


Рис. 1. Схема двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр

### Список литературы

1. Fedin P.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020 **1686** 012073
2. Селезнев Д.Н. и др. // Ядерная физика и инжиниринг, 2023, том 14, № 5, с. 494–497
3. Pryanishnikov K.E. et al. // Physics of Atomic Nuclei, 2022, Vol. 85, No. 11, pp. 1894–1898

А.Г. ВАСИЛЬЕВА, А.А. ДУРУМ, М.Ю. КОСТИН, А.В. ЛУТЧЕВ, В.А. МАИШЕЕВ, В.И. ПИТАЛЕВ, И.В. ПОЛУЭКТОВ, Ю.Е. САНДОМИРСКИЙ, М.Ю. ЧЕСНОКОВ, Ю.А. ЧЕСНОКОВ, А.А. ЯНОВИЧ

НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, Протвино, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКА 50-ГЭВ-НЫХ ПРОТОНОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ УСТРОЙСТВОМ С БОЛЬШИМ УГЛОВЫМ АКСЕПТАНСОМ

Созданные на сегодня фокусирующие кристаллические устройства подходят для применений на ускорителях ТэВ-ного класса, поскольку имеют малые поперечные размеры. Чтобы увеличить аксептанс устройства предлагается прибор, состоящий из нескольких кристаллов, собранных в массив. В работе приводятся результаты тестирования нового устройства на пучке У-70.

A.G. VASILYEVA, A.A. DURUM, M.YU. KOSTIN, A.V. LUTCHEV, V.A. MAISHEEV, V.I. PITALEV, I.V. POLUEKTOV, Y.E. SANDOMIRSKY, M.Y. CHESNOKOV, Y.A. CHESNOKOV, A.A. YANOVICH

NRC «Kurchatov Institute» - IHEP, Protvino, Russia

## STUDY OF 50-GeV PROTON BEAM FOCUSING BY A CRYSTAL DEVICE WITH A LARGE ANGULAR ACCEPTANCE

Modern crystal focusing devices are suitable for applications at TeV-class accelerators because they have small transverse dimensions. To increase the acceptance of the device, a device consisting of several crystals assembled into an array is proposed. The paper presents the results of testing a new device on the U-70 beam.

Созданные на сегодня фокусирующие кристаллические устройства на основе одной кремниевой пластины подходят для применений на ускорителях ТэВ-ного класса, поскольку имеют малые поперечные размеры [1]. Чтобы увеличить аксептанс устройства, создан прибор, состоящий из нескольких кристаллов, собранных в массив. В этом случае решаются две задачи: обеспечивается большой угол изгиба и приемлемый угловой аксептанс устройства. Перед тестированием в пучке 50 ГэВ-ных протонов была проведена оптическая проверка с помощью лазера, где показаны положительные характеристики.

В сеансе работы У-70 проведено тестирование в пучке устройства, состоящего из семи кристаллических пластин Si (111) толщиной 0.4 мм, длиной по пучку 40 мм, изогнутых на угол 100 мрад. Пучок протонов с энергией 50 ГэВ с малой угловой расходимостью  $\alpha_x = 0.1$  мрад, интенсивностью  $10^6$  частиц в секунду, наводился на кристаллический прибор с помощью телескопа из нескольких сцинтилляционных счетчиков S1&S2&S3 (рис. 1а).

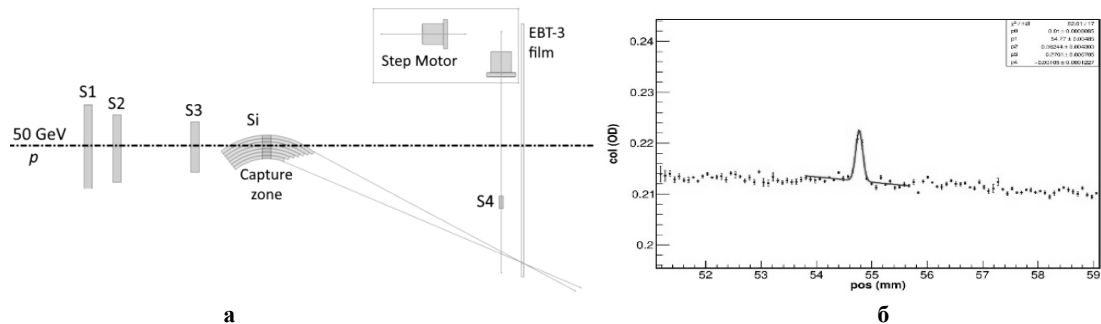


Рис. 1. Схема опыта по тестированию кристаллического устройства на протонном пучке (а), профиль пучка в фокусе (б)

Кристаллическая сборка была ориентирована так, чтобы траектории протонов выходили на касательную к изогнутым кристаллам в середине изгиба. В этом случае протоны захватываются в режим каналирования в результате эффекта объемного захвата [2]. Эффективность этого процесса невысока (около 0.3%), но такой режим позволяет равномерно засветить пучком все кристаллы в сборке. С помощью сканирующего счетчика малого поперечного размера S4, располагаемого за кристаллом, который мог перемещаться вдоль и поперек пучка, было уточнено фокусное расстояние, которое оказалось равным  $f = 0.7$  м. Точное измерение профиля пучка в фокусе было проведено с помощью полимерной радиохромной дозиметрической пленки EBT-3 (рис. 1б). Размер сфокусированного пучка в фокусе (на расстоянии  $f = 0.7$  м от кристаллов) равен  $\sigma = 0.1$  мм, что соответствует ожидаемому. Угловой аксептанс устройства равен  $accept_x = \pm 2$  мрад по горизонтали (в плоскости поворота пучка) и  $accept_y = \pm 7$  мрад по вертикали. Таким образом, устройство готово для создания реально-действующих систем формирования вторичных пучков частиц на ускорителе У-70.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00001).

### Список литературы

1. Vasilyeva A.G., Chesnokov M.Yu., Chesnokov Yu.A. et al. // Proceedings of RUPAC-2023, Novosibirsk, P.42.
2. Chesnokov Y.A., Galyaev N.A., Kotov V.I. et al. // Nucl. Instr. Meth. Phys.ics Res. 1992. Vol. 69. P. 247.

Р.О. ГАВРИЛИН<sup>1</sup>, А.В. СКОБЛЯКОВ<sup>1</sup>, А.О. ХУРЧИЕВ<sup>1</sup>, А.В. КАНЦЫРЕВ<sup>1</sup>, А.А. ГОЛУБЕВ<sup>1</sup>,  
Д.Н. НИКОЛАЕВ<sup>2</sup>, Д. ВАРЕНЦОВ<sup>3</sup>, Р. БЕЛИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия

<sup>3</sup>GSI, Дармштадт, Германия

<sup>4</sup>Goethe University Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany

## ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ РАСПЛАВА СЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ПРОТОННОЙ РАДИОГРАФИИ

Исследование свойств серы в условиях экстремально высокого давления и температуры важно в области планетарной физики и промышленности. На установке PRIOR II в GSI (Германия) методом протонной радиографии при энергии протонов 2.5 ГэВ и режиме медленного вывода пучка были проведены измерения вязкости расплава серы при давлении 90 бар и температуре в диапазоне от 150 до 350 °С. Для измерения применялся метод Стокса, при котором определяется скорость движения шарика, свободно падающего в исследуемой жидкости. Приводится сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими моделями.

R.O. GAVRILIN<sup>1</sup>, A.V. SKOBLIAKOV<sup>1</sup>, A.O. KHURCHIEV<sup>1</sup>, A.V. KANTSYREV<sup>1</sup>,  
A.A. GOLUBEV<sup>1</sup>, D.N. NIKOLAEV<sup>2</sup>, D. VARENTSOV<sup>3</sup>, R. BELIKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>FRC PCP MC RAS, Chernogolovka, Russia

<sup>3</sup>GSI, Darmstadt, Germany

<sup>4</sup>Goethe University Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany

## MEASURING THE VISCOSITY OF MELT SULFUR USING PROTON RADIOGRAPHY

The study of the properties of sulfur under conditions of extremely high pressure and temperature is important in the field of planetary physics and industry. Using the PRIOR II facility at GSI (Germany), the viscosity of sulfur melt was measured using proton radiography at a proton energy of 2.5 GeV and slow beam extraction mode at a pressure of 90 bar and a temperature in the range from 150 to 350 °C. For the measurements, the Stokes method was used, which determines the speed of movement of a ball freely falling in the liquid under study. A comparison of the obtained experimental results with theoretical models is provided.

Серa присутствует в атмосфере Венеры ближе к поверхности в небольших количествах, однако ее полимерные цепи участвуют в цикле окисления – одном из важнейших химических циклов на планете. Полимерная структура серы непосредственно влияет на ее вязкость и таким образом определение вязкости может помочь в изучении параметров атмосферы Венеры. В ходе протонно-радиографических измерений на установке PRIOR II [1] для получения изображений капсулы с расплавом серы (рис.1) использовался режим медленного вывода пучка с ускорителя SIS-18 длительностью 2 сек при энергии протонов 2.5 ГэВ и интенсивности пучка  $10^{11}$ . Для измерения вязкости расплава серы применялся метод Стокса [2], при котором измерялась скорость движения вольфрамового шарика диаметром 2 мм, свободно падающего в внутри заполненной серой титановой капсулы диаметром 14 мм с толщиной стенки 2 мм. Рассчитанное значение вязкости серы в сравнении с теоретическими расчетами [3] приведено на рис.1 справа. Максимальная вязкость, измеренная в проведенных экспериментах, составила  $\eta_{\max} = (10.2 \pm 0.6)$  Па·с.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

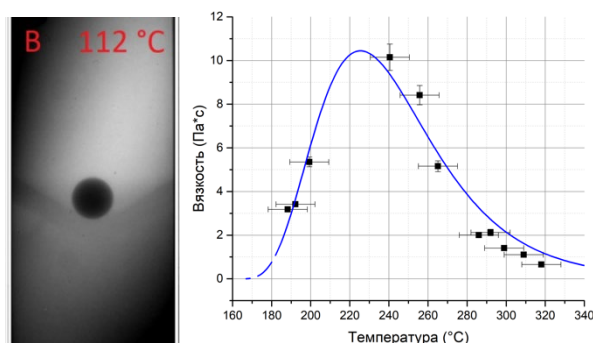


Рис. 1. Слева - радиографическое изображение капсулы, заполненной расплавом серы с шариком. Справа – рассчитанное по результатам измерений значение вязкости серы (черные точки) в сравнении с теоретическими расчетами (синяя кривая)

### Список литературы

1. D. Varentsov, et al. Rev.of Sc.Ins, 2016, 87, issue 2, p. 023303/1–023303/8;
2. Reynold E. Sukara & Richard A. Secco. High Pressure Research: An International Journal, 32:4, 451-456, 2012.
3. Stashick M.J., Sofekun G.O., Marriott R.A. AIChE J. 2020; 66:e16225.



## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ В УСКОРИТЕЛЕ У-70 ИФВЭ

В статье представлена измерительная система для определения эффективности кристаллических дефлекторов на ускорителе У-70 ИФВЭ.

D.A. SAVIN, V.T. BARANOV, V.I. TEREKHOV

Institute for High Energy Physics in National Research Centre "Kurchatov Institute", 142281 Protvino, Russia.

## MEASURING INSTRUMENTS FOR STUDY THE CHARACTERISTICS OF CRYSTAL DEFLECTORS AT THE U-70 IHEP

The article presents a measuring system for determining the efficiency of crystal deflectors at the U-70 synchrotron of IHEP.

На протяжении ряда лет в ИФВЭ ведутся работы по разработке кристаллических дефлекторов на основе изогнутых монокристаллов кремния. В 86 прямолинейном промежутке синхротрона У-70 была разработана и введена в эксплуатацию система локализации пучка (ФЭП), состоящая из бамп-магнитов, поглотителя пучка и системы диагностики. В последнее время ФЭП используется как стенд для определения эффективности различных изогнутых кристаллов, применяемых при выводе пучка на физические установки. Для этого стенда были разработаны и установлены в 84 промежутке две станции кристаллических дефлекторов и разработана автоматизированная система диагностики пучка [1; 2]. Исследуемые кристаллические устройства устанавливаются в станцию вблизи поглотителя пучка, которая обеспечивает линейное и угловое перемещение кристалла внутри вакуумной камеры.

Эффективность работы установленных кристаллов определяется профилометрами, установленными перед поглотителем путем их сравнения при забросе пучка кикер-магнитом, а качество работы системы коллимации пятью ионизационными камерами, расположенными после поглотителя.

Система диагностики параметров пучка на поглотителе состоит (рис. 1):

- из пяти радиационных мониторов на основе ионизационных камер расположенных вблизи поглотителя. Они дают распределение потерь при взаимодействии пучка с кристаллом.

- из двух 2-х плоскостных профилометров (24 канальный горизонтальный и 32 канальный вертикальный) предназначенных для измерения профиля при попадании отклоненного кристаллом пучка на поглотитель ФЭП.

Обработка сигналов с камер и профилометров основана на двухуровневой электронике. Нижний уровень осуществляет интегрирование сигналов с помощью зарядочувствительных интеграторов. Выходы этих интеграторов мультиплицируются при помощи специального блока. Сигналы с выходов мультиплексов поступают на обрабатывающую электронику верхнего уровня.

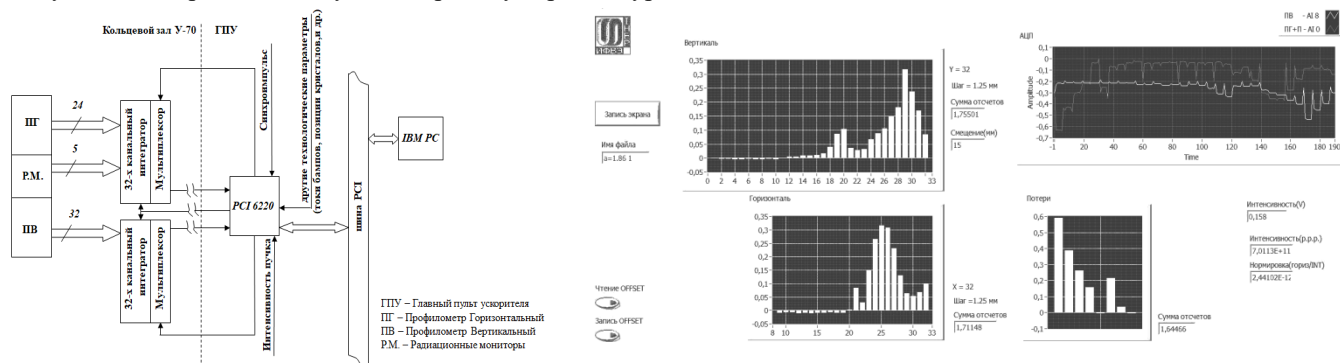


Рис. 1. Упрощенная блок схема системы диагностики (слева) и экран отображения информации системы (справа)

Верхний уровень электроники основан на использовании промышленного компьютера с DAQ платой. Программное обеспечение для сбора и обработки информации разработано в программной среде LabVIEW.

В качестве примера на экране отображения информации системы (рис. 1) показано распределение плотности протонного пучка, заброшенного на поглотитель. Здесь же приводится распределение потерь пучка вблизи поглотителя по радиационным мониторам.

### Список литературы

1. А.Г. Афонин, В.Т. Баранов и др., Вывод пучка протонов из ускорителя ИФВЭ с помощью коротких кристаллов кремния, ЭЧАЯ, 2005. т.36. вып.1, стр. 43-99;
2. А.Г. Афонин, Ю.А. Чесноков, Д.А. Савин и др., Исследования вывода и коллимации пучка в кольцевом ускорителе с помощью новой кристаллической техники, Письма в ЖЭТФ, 2010, том 92, вып. 4, с. 223-237.

**ДИНАМИКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В SEIR МОДЕЛИ**

В рамках стандартной SIER модели обсуждается влияние динамики аэрозолей на константу скорости передачи воздушно-капельных вирусных инфекций. Задача рассматривается на примере популяции постоянной численности в предположении равенства скорости выздоровевших и заболевших. Также считаются постоянными характерные времена развития болезни и выздоровления. Полученные аналитически соотношения применены для установления допустимой области управляющих параметров, обеспечивающих образование и существование неравновесных распределений, которые можно трактовать как латентную эпидемиологическую фазу. Используя эту информацию и развитый в химической кинетике подход к расчету констант скоростей химических реакций, предложена зависимость константы скорости передачи инфекций от динамических характеристик выдыхаемых аэрозолей и расстояния между людьми.

A.R. KARIMOV, M.A. SOLOMATIN

*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia***DYNAMICS OF AEROSOL PARTICLE SPREAD IN THE SEIR MODEL**

Within the standard SEIR model, the influence of aerosol dynamics on the transmission rate constant of airborne viral infections is discussed. The problem is considered using the example of a population with a constant number and assumes the equality of the rates of recovery and infection. The characteristic times for the development of the disease and recovery are also considered constant. The analytically derived relationships are applied to determine the permissible range of control parameters, ensuring the formation and existence of nonequilibrium distributions, which can be interpreted as a latent epidemiological phase. Using this information and the approach developed in chemical kinetics for calculating the rate constants of chemical reactions, a relationship is proposed for the infection transmission rate constant from the dynamic characteristics of exhaled aerosols and the distance between people.

При описании распространения эпидемий широко используются компартментарные модели, в которых вероятности передачи заболеваний, время развития и выздоровления определяются из анализа эпидемиологических данных (см, например, [1-3]). Такой подход позволяет уловить основные тенденции развития эпидемий, однако игнорирует непосредственное влияние окружающей среды на вероятности соответствующих эпидемиологических переходов. В настоящей работе обсуждается возможность включения в SEIR модель процессов переноса аэрозолей, являющихся переносчиками вирусных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем.

Эта задача рассматривается на примере популяции постоянной численности в предположении равенства скорости выздоровевших и заболевших, когда в популяции происходит формирование динамического равновесия между заболевшими и выздоровевшими. Существование такой промежуточной фазы определяет развитие или затухание заболевания во всей популяции, но реализация конкретного сценария эпидемии задается соотношением между константами скоростей соответствующих эпидемиологических переходов.

Поскольку данные управляющие параметры зависят как от медико-биологических особенностей отдельных людей, так и физических условий окружающей среды, то было бы интересно подойти к непосредственному определению эпидемиологических констант, отталкиваясь от известных физико-химических подходов. Так, формальная близость уравнений SIER модели и химической кинетики наводит на мысль применить для этого концепцию квазиравновесия для сложных реакций и развитый в химической кинетике подход к расчету констант скоростей химических реакций [4]. В настоящей работе именно такая аналогия между уравнениями химической кинетики и математической эпидемиологии была использована, чтобы установить условий образование и существование неравновесных распределений в популяции. Также предложена зависимость константы скорости передачи инфекций от динамических характеристик выдыхаемых аэрозолей и расстояния между людьми.

*Список литературы*

1. Brauer, F., Castillo-Chavez, C. and Castillo-Chavez, C. *Mathematical models in population biology and epidemiology* (New York: Springer, 2012).
2. Li M. Y. et al. Global dynamics of a SEIR model with varying total population size // *Mathematical biosciences*. – 1999. – Т. 160. – №. 2. – С. 191-213.
3. Hethcote H. W. The mathematics of infectious diseases // *SIAM review*. – 2000. – Т. 42. – №. 4. – С. 599-653.
4. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. *Курс химической кинетики* (Москва: Высшая школа, 1984).

К.В. СУХАРЕВ<sup>1</sup>, А.П. ВОРОБЬЕВ<sup>1</sup>, С.Н. ГОЛОВНЯ<sup>1</sup>, О.П. ТОЛБАНОВ<sup>2</sup>, А.В. ТЯЖЕВ<sup>2</sup>,  
А.Е. ВИННИК<sup>2</sup>, М.С. СКАКУНОВ<sup>2</sup>, А.Н. ЗАРУБИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 142281, Московская область, город Протвино,  
площадь Науки, дом 1; телефон: +7 (4967) 71-36-23; Email: Kirill.Sukharev@ihep.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет, Томск

## ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПФИРОВЫХ СЕНСОРОВ ДЛЯ ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Представлены первые результаты апробации детекторов на основе искусственных монокристаллов сапфира на пучке ионов углерода с энергией 175-380 МэВ. Рассмотрены возможности использования таких детекторов для решения как дозиметрических задач, так и для разработки систем контроля пучка в канале. Намечены дальнейшие пути исследования сапфира, как чувствительного сенсора для детектирования заряженных частиц.

K.V. SUKHAREV<sup>1</sup>, A.P. VOROBYOV<sup>1</sup>, S.N. GOLOVNYA<sup>1</sup>, O.P. TOLBANOV<sup>2</sup>,  
A.V. TYAZHEV<sup>2</sup>, A.E. VINNIK<sup>2</sup>, M.S. SKAKUNOV<sup>2</sup>, A.N. ZARUBIN<sup>2</sup>

, Russia Federal State Budgetary Institution "A.A. Logunov Institute of High Energy Physics of the National Research Center  
"Kurchatov Institute", 142281, Protvino, Moscow region, 142281; phone: +7 (4967) 71-36-23; Email: Kirill.Sukharev@ihep.ru

<sup>2</sup>Tomsk State University, Tomsk

## THE POSSIBILITIES OF USING SAPPHIRE SENSORS FOR ION RADIATION THERAPY

The first results of testing detectors based on artificial single crystals of sapphire on a beam of carbon ions with an energy of 175-380 MeV are presented. The possibilities of using such detectors for solving both dosimetric tasks and for developing beam monitoring systems in the channel are considered. Further ways of studying sapphire as a sensitive sensor for detecting charged particles are outlined.

Целесообразность исследования возможности использования детекторов из монокристаллического искусственного сапфира в дистанционной лучевой терапии следует из сравнения параметров медицинских пучков протонов и ионов углерода, используемых в адронной терапии онкологических заболеваний, с имеющимися мировыми исследованиями транспорта носителей заряда в искусственных сапфирах и характеристик сенсоров при облучении бета-частицами и тяжелыми ионами [1,2].

В настоящей работе представлены результаты первых испытаний сапфировых сенсоров на пучке ионов углерода с энергией 175 и 380 МэВ/нуклон. Измерены зависимости сигналов сенсоров от приложенного высокого напряжения от 50 до 500В, зависимости сигналов от интенсивности пучка ионов углерода. Используя радиохромную плёнку ЕВТ-3, установленную перед сапфировыми сенсорами, измерено соотношение между поглощённой дозой в плёнке и суммарным зарядом, зарегистрированным сенсорами. Измерена зависимость величины сигналов сенсоров при напряжении на них 500В при постоянной интенсивности пучка после облучения дозой, регистрируемой относительным дозиметром. Впервые для сапфировых сенсоров измерена зависимость дифференциальной поглощённой дозы в водном фантоме (кривая Брэгга), Сигналы с детекторов измерялась при напряжении на детекторах 500В и времени интегрирования 900мс в интервале интенсивностей  $7,0 \cdot 10^7 \div 4,5 \cdot 10^8$  ионов/импульс.

Для проведения испытаний образцов сенсоров на пучке ионов углерода использовалась измерительная система, включающая в себя: плату фронт-энд электроники, персональный компьютер, крейт КАМАК и программное обеспечение, осуществляющее контроль измерительной системы, сбор, визуализацию и хранение полученных экспериментальных данных.

### Список литературы.

1. F. Wang et al., Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectrometer, SPIE Proceedings, 2004
2. А.В. Ефимов, Наноразмерные эффекты на поверхности монокристаллов Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO, вызванные тяжёлыми ионами высоких энергий, Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Дубна – 2004 г

Я.М. АБАКУМОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

### **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БАНЧЕРОВ Б1-Б3**

В докладе будет представлен обзор унифицированной конструкции группирователей Б1-Б3 для линейного ускорителя протонов и лёгких ионов, описаны основные особенности конструкции, связанные с необходимостью подстройки рабочей частоты, обеспечения допусков формы и размера, задаваемых на боковые и центральную трубки дрейфа с условием сохранения вакуумной герметичности камеры во время юстировки.

Y.M ABAKUMOV

*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

### **ENGINEERING DESIGN OF BUNCHER SECTIONS B1-B3**

The report will provide an overview of the unified design of the B1-B3 grouping devices for a linear proton and light ions accelerator, describe the main design features associated with the need to adjust the operating frequency, ensure shape and size tolerances set for the side and central drift tubes with the condition of maintaining the vacuum tightness of the chamber during alignment.

Начиная с 2018 года в РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, ведется разработка нового ионно-синхротронного комплекса. НИЯУ МИФИ занимается разработкой линейного ускорителя ЛУ1, который будет ускорять ионы от протонов до кислорода до энергии 7,5 МэВ/нуклон. Все ускоряющие и группирующие резонаторы будут работать на одинаковой частоте 81,25 МГц. Новый комплекс будет включать в себя модуль Б1 для предварительной группировки пучков и второй группирователь Б2 для контроля длины пучка и обрезки его хвоста. Две группы полостей также будут разделены короткой транспортной линией, включающей в себя один резервный банчер Б3[1].

В данной работе представляется конструкция резонаторов банчеров Б1 – Б3. Будут показаны основные особенности, связанные с их изготовлением и унификацией конструкции, а также предложена система юстировки пролётных каналов, основанная на квадроде и обеспечивающая вакуумную герметичность.

#### *Список литературы*

1. S.M. Polozov et al., “The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector”, in Proc. RuPAC’21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 51-54

И.Р. КАЛИЕВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАСЧЕТ СМЕЩЕНИЯ ТРУБОК ДРЕЙФА ИЗ-ЗА ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ В РЕЗОНАТОРАХ ИИ-ТИПА

Для резонаторов ИИ-типа линейного ускорителя-инжектора легких ионов ЛУ1 [1], разрабатываемого в НИЯУ МИФИ для нового ускорительного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ (Россия, Саров), проведены расчеты смещения трубок дрейфа из-за теплового расширения при протекании высокочастотных токов.

I.R. KALIEVA

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF DISPLACEMENT OF DRIFT TUBE DUE TO THERMAL EXPANSION DURING HIGH FREQUENCY HEATING IN II-TYPE CAVITIES

For the II-type cavities of the linear accelerator-injector of light ions LU1 [1], which is being developed at the National Research Nuclear University «MEPhI» for the new accelerator complex RFNC-VNIIEF (Russia, Sarov), calculations of the displacement of drift tubes due to thermal expansion during the flow of high-frequency currents were carried out.

Новый ускорительный комплекс РФЯЦ-ВНИИЭФ предназначен для обеспечения в лабораторных условиях полного цикла моделирования воздействия излучения на электронно-компонентную базу, приборы и изделия космической техники. Ускоритель-инжектор ЛУ1 [1] предназначен для ускорения легких заряженных частиц с отношением  $A/Z = 1/3$  и включает в себя две группы пяти-зазорных резонаторов ИИ-типа [2-7]. Рабочая частота резонаторов 81,25 МГц. Максимальное ускоряющее напряжение составляет 1,5 МВ для резонаторов первой группы и 3,0 МВ для второй группы. Расчеты проводились для двух вариантов исполнения конструкции опоры крепления трубок дрейфа: а) полностью медная опора и трубки дрейфа; б) медные трубки дрейфа и опора из нержавеющей стали с медным покрытием. Результаты моделирования приведены в суммарной таблице 1. Оценка смещения трубок дрейфа относительно оси пролета пучка  $\Delta y$  проводилось для двух вариантов режима работы: с частотой повторения  $\nu = 1$  Гц и  $\nu = 5$  Гц. Длительность ВЧ-импульса  $t_{вч} = 350$  мкс.

Таблица 1. Результаты расчетов нагрева, деформаций и смещение частот в резонаторах ИИ-типа ускорителя ЛУ1

	ИИ-1 а)		ИИ-1 б)		ИИ-2 а)		ИИ-2 б)	
$\nu$ , Гц	5	1	5	1	5	1	5	1
$\Delta T$ , К	12,1	2,4	22,5	4,5	30,6	6,2	45,0	9,1
$\Delta y$ , мкм	79	16	139	28	173	35	248	50
$\Delta f$ , кГц	-28	-6	-46	-9	-45	-9	-64	-13

Показано, что при частоте повторения 5 Гц смещение в области трубок дрейфа из-за теплового расширения составляет более 50 мкм для обоих вариантов конструкции. Для уменьшения величины смещения требуется охлаждение трубок дрейфа. При частоте повторения 1 Гц смещение в области трубок дрейфа не превышает 50 мкм.

### Список литературы

1. S.M. Polozov et al., The conceptual design of the 7.5 MeV/U light ion injector, Proc. of RuPAC2021, 51-54, 2021. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB07
2. Gorchakov, A.A. et al., Development of II-type accelerating structures, Physics of Atomic Nuclei. 2021. Т. 84. № 12. С. 2018-2021.
3. А.А. Горчаков и др., Разработка ускоряющих структур И-типа, ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С.404-405.
4. А.А. Горчаков и др., Компенсация дипольной составляющей ускоряющего поля в структурах И-типа, ЛаПлаз-2021: Сборник научных трудов. Ч.2. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 410-411.
5. M. M. Bulgacheva et al., Geometry Selection of the Power Coupling Loop for H-type Cavities Physics of Atomic Nuclei, 2022, 85(12), pp. 2061–2065.
6. M. M. Bulgacheva et al., Development of the Power Coupler for the H-Type Resonators, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2023, Vol. 20, No. 4, pp. 720–723.
7. А.С. Сулимов, Оценка влияния поперечного ускоряющего поля в структурах ИИ типа на динамику частиц, ЛаПлаз-2023: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2023. С. 312.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРЯЮЩИХ СТРУКТУРАХ ПИРС

В связи с расширением географии проведения пуско-наладочных работ замедляющих структур ускорителей заряженных частиц возникает потребность в уменьшении габаритов используемого тестового оборудования. В данной работе описана модернизированная программа управления стендом измерения электромагнитного поля в ускоряющих структурах ПИРС, работающая на базе одноплатных компьютеров и поддерживающая использование компактных векторных анализаторов.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY, A.A. TUMANOVA  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MODERNIZATION OF THE ACCELERATING STRUCTURE FIELD DISTRIBUTION MEASUREMENT BENCH PIRS

Due to the expansion of the charged particle accelerator accelerating structures testing sites, there is a need to reduce the size of the test equipment used. This paper describes an upgraded program for controlling the accelerating structure electromagnetic field measuring stand PIRS, running on single-board computers and supporting the use of compact vector analyzers.

Для сокращения габаритов измерительного оборудования управляющая программа не использует графическую оболочку ОС, что позволяет запускать её на одноплатных компьютерах без подключения мониторов. В качестве интерфейса используется Web-приложение, оптимизированное для работы как со стационарными компьютерами, так и с мобильными устройствами.

Одним из поддерживаемых программой управления векторных анализаторов является компактный векторный анализатор LiteVNA [1].

Стенд измерения (см. рис. 1) ускоряющих структур **1** состоит из шагового двигателя **2** и векторного анализатора **3**, управляемых одноплатным компьютером **4**. Соединение с клиентами **5** происходит через сетевое соединение **6**. В стенде реализуется измерение распределения электромагнитного поля в ускоряющей структуре методом малых возмущений [2] по схеме четырехполосника, в которой определяется коэффициент передачи структуры при перемещении в ней возмущающего тела. Стенд может быть использован для проведения измерений по схеме двухполосника, в которой измеряется коэффициент отражения структуры. На рис.2 представлен пример измеренного распределения ускоряющего поля в виде страницы WEB-приложения.

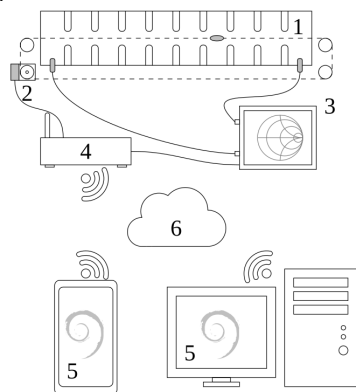


Рис. 1. Схема подключения устройств в рамках измерительного стенда ПИРС

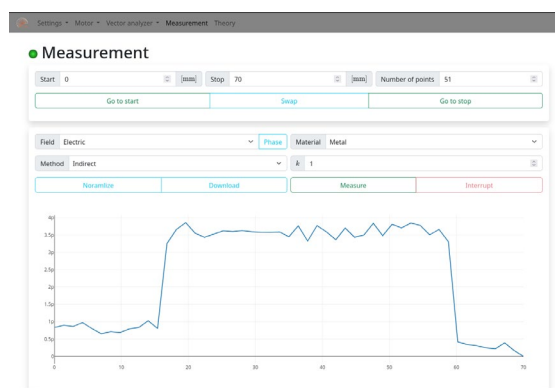


Рис. 2. Страница Web-приложения

Взаимодействие с управляющей программой происходит по схеме клиент-сервер. Управляющие HTTP запросы поступают от клиентов к серверу. Для обеспечения интерактивности Web-приложения и синхронизации состояния подключённых клиентов, уведомления об изменении конфигурации сервера транслируются всем подключённым клиентам посредством WebSocket соединения.

Такая схема работы позволяет использовать программу как в режиме ручного управления пользователем через Web-приложение, так и в рамках роботизированных установок автоматической настройки ускоряющих структур с использованием HTTP запросов.

### Список литературы

1. LiteVNA portable network analyzer // <https://zeenko.tech/litevna>
2. Собенин Н.П., Милованов О.С. / Техника сверхвысоких частот. Издание второе, переработанное и дополненное // М., Энергоатомиздат, 2007.

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ИМПУЛЬСНОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЭНЕРГИИ И СИСТЕМОЙ ПИТАНИЯ ЧЕРЕЗ МОСТ

Проведён анализ рабочих режимов линейного ускорителя электронов с импульсной ступенчатой перестройкой энергии и системой питания через мост, предназначенного для промышленной томографии, инспекции грузов. Импульсная перестройка энергии обеспечивает работу ускорителя в режимах высокой и низкой энергии. Рассмотрены возможности обеспечения режима низкой энергии с помощью торможения пучка либо отключения части ускоряющей системы. Получены условия устойчивой работы автогенератора в системе питания ускорителя.

V.I. KAMINSKIY, S.V. MATSIEVSKIY

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CHARACTERISTICS ANALYSIS OF ELECTRON ACCELERATOR WITH PULSED ENERGY TUNING AND BRIDGE POWER SUPPLY SYSTEM

Operating modes analysis of linear electron accelerator with pulsed step energy tuning and bridge power supply system designed for industrial tomography and cargo inspection is carried out. Pulsed energy tuning ensures operation of accelerator in high and low energy modes. Possibilities of providing low-energy mode by beam decelerating or disconnecting part of accelerating system are considered. Stable operation conditions of autogenerator in accelerator power system are obtained.

Обеспечение режима двух энергий в установках промышленной томографии, инспекции грузов, осуществляется различными методами [1]. Возможными способами реализации режима низкой энергии могут быть торможение пучка в ускоряющей системе либо отключения части ускоряющей системы из режима ускорения. В настоящей работе рассмотренные схемы ускорителя базируются на мостовой развязке генератора и высокооборотных ускоряющих секций, а также учитываются особенности данной развязки.

Перестройка энергии обеспечивается переключением части ускоряющих секций в режим торможения либо их отключения за счёт существенной расстройки их рабочей частоты. На рис.1, 2: 1 – питающий генератор, 2, 3 – парные ускоряющие секции со стоячей волной (бипериодические ускоряющие структуры), 4 – волноводный мост, 5 – поглощающая нагрузка, 6 – фазовращатель (работающий в импульсном режиме в схеме на рис.1), 7 – режекторный фильтр, работающий в импульсном режиме (в схеме на рис. 2). Питание секций 3 осуществляется мощностью, отражённой от секций 2. При этом входные сопротивления секций 2 настраиваются таким образом, чтобы обеспечивать как необходимые ускоряющие поля в секциях 2, так и отражение необходимой мощности для питания секций 3.

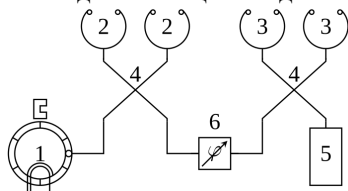


Рис. 1. Схема ускорителя с переключением выходных секций из режима ускорения в режим торможения пучка

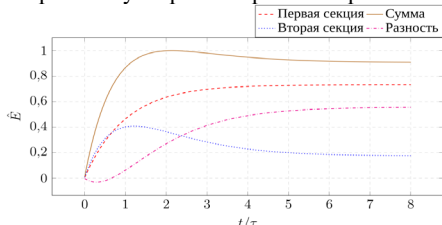


Рис. 3. Переходный процесс энергии пучка в режиме низкой и высокой энергии

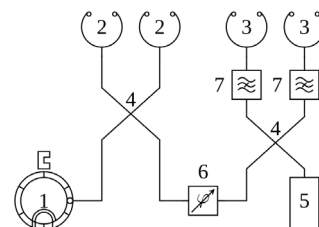


Рис. 2. Схема ускорителя с переключением выходных секций из режима ускорения в режим выключения

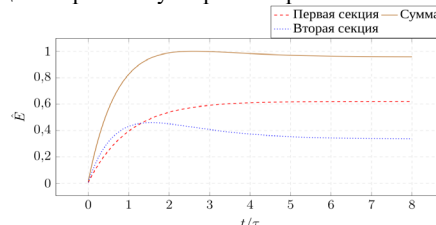


Рис. 4. Переходный режим энергии пучка в режиме низкой и высокой энергии

На рис. 3, 4 приведены кривые переходного режима энергии пучка в соответствующих схемах ускорителя. В работе определены требования к характеристикам ускоряющих секций, элементов высокочастотного тракта, импульсных переключающих узлов, при выполнении которых реализуется ступенчатая перестройка энергии электронов от импульса к импульсу.

### Список литературы

1. Завадцев А.А. и др. / Система инспекции грузов на основе дуального линейного ускорителя электронов // ПТЭ, №2, 2011, с. 101-159.

В.В. ПАРАМОНОВ

ФГБУН Институт Ядерных Исследований РАН, 117312, Москва, Россия

## СМЕЩЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ ТИПА Н ИЗ ОКРЕСТНОСТИ РАБОЧЕЙ МОДЫ В УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЕ SDTL

В коротких резонаторах структуры SDTL, работающей на колебании TM010, не предусматривается элементов для смещения нерабочих колебания и стабилизации распределения ускоряющего поля. Исследование дисперсионных свойств SDTL показало возможность нежелательного приближения частоты моды TE111 к рабочей, что ограничивает свободу в выборе параметров резонатора. Предложен способ смещения частоты моды TE111 с одновременным улучшением стабильности распределения поля на рабочем колебании.

V. PARAMONOV

INR RAS, 117312B Moscow, Russia

## DISPLACEMENT OF H-MODES FROM THE VICINITY OF OPERATING ONE IN THE SDTL ACCELERATING STRUCTURE

In the short cavities of the SDTL structure, operating on the TM010 mode, elements are not provided for biasing non-working modes and stabilizing the distribution of the accelerating field. A study of the SDTL dispersion properties showed the possibility of an undesirable oncoming of the TE111 mode frequency to the operating one, which limits the freedom in choosing the cavity parameters. A method is proposed to shift the frequency of the TE111 mode while simultaneously improving the stability of the field distribution at the operating mode.

В трубках дрейфа Separated Drift Tube Linac (SDTL) [1], нет фокусирующих элементов, которые вынесены за пределы резонатора, что существенно упрощает изготовление, настройку, юстировку и обслуживание резонаторов. Исследование дисперсионных свойств SDTL, [2], в диапазоне применимости структуры показали опасное приближение частоты моды TE111 к рабочей частот, что является ограничивающим фактором при разработке резонаторов.

Для повышения частоты ближайшей моды TE111 с пучностью магнитного поля в плоскости штанг предлагается ввести в резонатор проводник, образующий с обечайкой резонатора замкнутый контур и расположенный перпендикулярно оси в середине резонатора длиной  $L$ , (рис. 1а). Составляющая Hz моды TE111 наводит в таком контуре токи, которые подавляют Hz в окрестности контура, что с необходимостью ведет к повышению частоты моды. Величина смещения по частоте определяется в основном площадью контура.

Для мод семейства TM01n введенный проводник как полуволновый вибратор является взаимодействующим резонансным элементом. Обеспечивается отображенная на графиках (рис. 1б) картина резонансного взаимодействия. При этом обеспечивается улучшение разделения по частоте рабочей моды TM010 и ближайшей TM011, что ведет к повышению стабильности распределения ускоряющего поля.

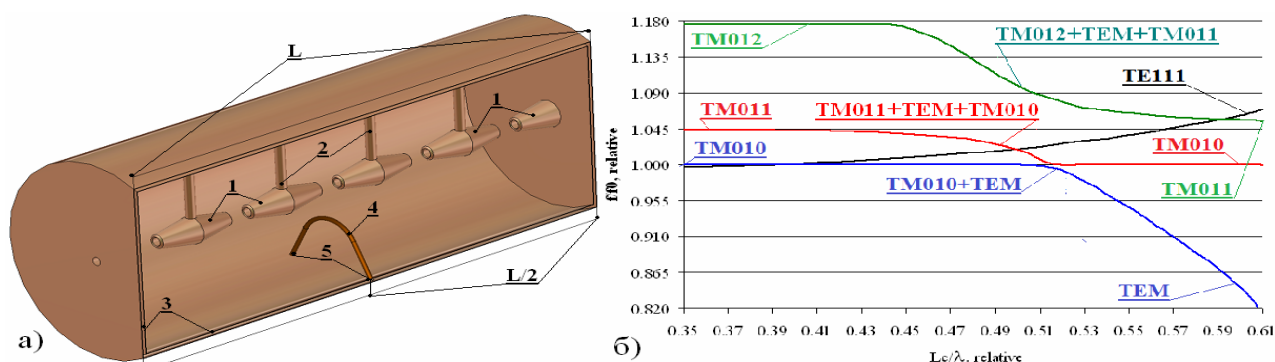


Рис. 1. Резонатор SDTL (а), 1 – трубки дрейфа, 2- штанги, 3 – корпус, 4 – вводимый проводник и (б) – графики зависимостей частот мод в резонаторе по (а) от длины проводника.

### Список литературы

1. Т.Като // Proposal of a Separated-type Drift Tube Linac for a Medium-Energy Structure. KEK report 92-10, 1992
2. V. Paramonov / Dispersion properties of the SDTL accelerating structure. Physics of Atomic Nuclei, v. 86, n. 12, p. 2680, 2023



А.И. СЕМЕННИКОВ, А.Л. СИТНИКОВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ, Т.В. КУЛЕВОЙ, Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ  
*Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия*

## **КОНСТРУКЦИЯ УСКОРЯЮЩЕГО ПЯТИ ЗАЗОРНОГО РЕЗОНАТОРА С ТРУБКАМИ ДРЕЙФА**

В ККТЭФ НИЦ «Курчатовский Институт» ведутся работы по разработке линейного ускорителя (ЛУ) с отношением массы к заряду  $A/Z = 1$ , энергией 13 МэВ/н и током 100 мА. ЛУ состоит из ускорителя с пространственно однородной квадрупольной фокусировкой (ПОКФ), работающего на частоте 162,5 МГц, и ускоряющей структуры с трубками дрейфа (DTL), работающих на частоте 162,5 МГц.

Предполагается, что ускоряющая структура DTL будет состоять из 6 пятызазорных H-резонаторов.

A.I. SEMENNIKOV, A.L. SITNIKOV, G.N. KROPACHEV, T.V. KULEVOY, D.N. SELEZNEV  
*National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## **MECHANICAL DESIGN OF FIVE-GAPS DTL**

The new linac for  $A/Z = 1$ , output energy 13 MeV/u and 100 mA current is under development at NRC "Kurchatov Institute"-ITER. The linac consists of Radio-Frequency Quadrupole (RFQ) with operating frequency 162,5 MHz and one section of Drift Tube Linac (DTL) with operating frequency 162,5 MHz.

The DTL consists of 16 5-gaps IH cavities. The paper presents mechanical design of DTL resonator.

Наиболее перспективной является схема, когда ускоритель состоит из двух секций: RFQ и DTL, между которыми осуществляется 6-мерное согласование пучка [1]. Секция DTL построена по модульному принципу и состоит из цепочки отдельных, индивидуально фазируемых H-резонаторов, с фокусировкой магнитными квадрупольями, размещаемыми между ними. Такое построение DTL обеспечивает компактность ускорителя, допускает посекционную настройку и последовательный ввод в действие.

В данной работе представлена конструкция ускоряющего пяти-зазорного резонатора с трубками дрейфа.

### *Список литературы*

1. The Proton LINAC for Compact Neutron Source DARIA, G. Kropachev, T. Kulevoy and A. Sitnikov, Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2023, Vol. 17, No. 4, pp. 753–758;

А.Л. СИТНИКОВ, Г.Н. КРОПАЧЕВ

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт" Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЕЙНОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С RFQ ДЛЯ ПРОЕКТА ЛУЧ-ПРОТОН

В НИЦ "Курчатовский институт" разрабатывается линейный ускоритель протонов для проекта Луч-Протон, который предназначен для предварительного ускорения протонного пучка до энергии 5 МэВ с последующим инжектированием его в протонный синхротрон.

В работе представлены электродинамические характеристики линейный ускоритель протонов для проекта Луч-Протон.

A.L. SITNIKOV, G.N. KROPACHEV

National Research Centre "Kurchatov Institute" Kurchatov complex for theoretical and experimental physics, Moscow, Russia

## THE RF PARAMETERS OF PROTON RFQ LINAC FOR LUCH-PROTON PROJECT

The Kurchatov Institute is developing a linear proton accelerator for the Luch-Proton project, which is designed to accelerate a proton beam to an energy of 5 MeV and then inject it into a proton synchrotron.

The paper presents the RF parameters of a linear proton accelerator for the Luch-Proton project.

В НИЦ "Курчатовский институт" разрабатывается линейный ускоритель протонов для проекта Луч-Протон, который предназначен для предварительного ускорения протонного пучка до энергии 5 МэВ с последующим инжектированием его в протонный синхротрон.

Линейный ускоритель - инжектор протонного синхротрона проекта ЛУЧ-Протон, это резонансная структура с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой (RFQ). 3D модель структуры RFQ представлена на Рисунке 1. Структура RFQ состоит из 9 секций, образующих единый вакуумный объем, внутри которого расположены четыре продольных электрода на всю длину структуры. На гребне каждого электрода нанесена синусоидальная модуляция.

Основные требования к разрабатываемому инжектору сформулированы в Таблице 1.

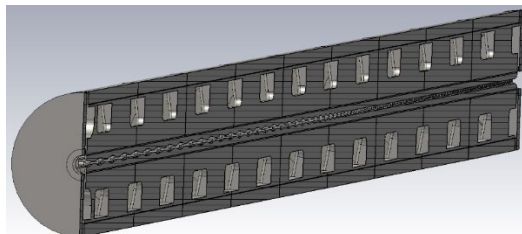


Рис. 1. 3D модель структуры RFQ с обечайкой круглого сечения

Таблица 1. Основные требования к разрабатываемому инжектору

Параметр	Значение
Ускоряемые частицы	протоны
Выходная энергия из ионного источника	45 кэВ
Ток пучка на входе RFQ	30 мА
Нормализованный эмиттанс на входе RFQ (95% частиц)	$\leq 0.75 \pi$ мм мрад
Выходная энергия RFQ	5 МэВ
Разброс по импульсам на выходе RFQ (95% частиц)	$\pm 0.6\%$
Нормализованный эмиттанс на выходе RFQ (95% частиц)	$\leq 1 \pi$ мм мрад

## МУЛЬТИПАКТОРНЫЙ РАЗРЯД В РЕЗОНАТОРАХ-БАНЧЕРАХ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ

Для группирующих резонаторов линейного ускорителя легких ионов [1] проведен расчет пороговых уровней возникновения мультипакторного разряда в области зазора между корпусом резонатора и элементами подстройки частоты (плунжерами). Получены картины распределения полей в зазоре и определены значения напряженности поля при различных значениях рабочего напряжения резонаторов.

N.F. DREBEZOVA, A.A. TUMANOVA

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MULTIPACTOR DISCHARGE IN BANCHER CAVITIES OF A LINEAR ACCELERATOR OF LIGHT IONS

For buncher cavities of a linear accelerator of light ions [1], threshold levels of the occurrence of a multipactor discharge in the region of the gap between the resonator body and frequency tuning elements (plungers) were calculated. Patterns of the distribution of fields in the gap are obtained and the values of the field strength at different values of the operating voltage of the resonators are determined.

Линейный ускоритель легких ионов [1], разрабатываемый в НИЯУ МИФИ, включает в себя группирующие резонаторы на основе четвертьволновых коаксиальных линий. Первый резонатор входит в состав канала транспор-тировки пучка с низкой энергий ЛЕВТ, второй расположен в канале транспортировки пучка со средней энергий МЕВТ. Рабочее напряжение первого резонатора составляет  $(4 \div 8)$  кВ, второго -  $(50 \div 150)$  кВ. Результаты расчета пороговых уровней мультипакторного разряда для данных резонаторов без учета периферийных устройств (ввод мощности, элементы подстройки частоты, измерительные антенны) представлены в работе [2]. В данной работе проведено исследование для локальной области – зазора, возникающего между элементами подстройки частоты и корпусом резонатора рис.1. Расчет проводился для зазоров 0,5 мм и 1 мм.

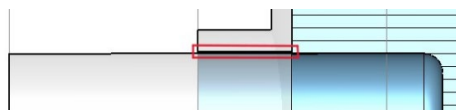


Рис. 1. Область зазора между плунжером и корпусом резонатора

Проведен аналитический расчет пороговых уровней напряженности электрического поля по формуле [3], описывающей мультипакторный разряд между двумя поверхностями:  $E = 4\pi m f^2 d / e(2n-1)$ , где  $m$  – масса электрона,  $f = 81,25 \text{ МГц}$  – частота резонатора,  $e$  – заряд электрона,  $n=1$  – первый порядок мультипакторного разряда и  $d$  – расстояние между стенками. Получены значения:  $E_{0,5} = 235,9 \text{ В/м}$  и  $E_1 = 471,8 \text{ В/м}$ .

Получены картины распределения напряженности электрического поля в зазорах с учетом рабочих напряжений. Пример распределения поля для зазора 1 мм в группирующем резонаторе канала транспортировки ЛЕВТ представлен на рис.2.

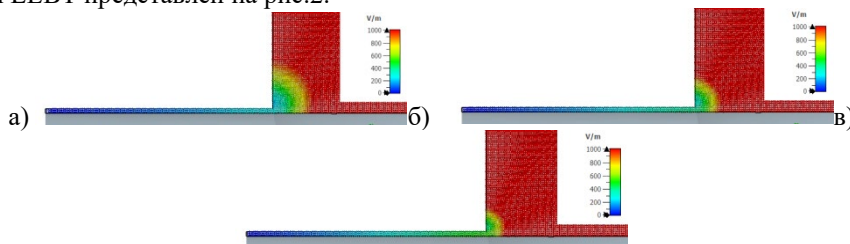


Рис. 2. Картины распределения электрического поля в зазоре 1 мм между элементом подстройки частоты и корпусом резонатора-банчера: 4 кВ (а), 6 кВ (б), 8 кВ (в)

Показано, что для обоих резонаторов с учетом значений рабочего напряжения величины напряженности поля в зазоре сопоставимы с пороговыми уровнями напряженности поля при которых возможно развитие мультипакторного разряда. В этой связи, элементы подстройки частоты (плунжеры) должны иметь элементы, обеспечивающие предотвращение проникновения поля из резонатора в зазор.

### Список литературы

1. S.M. Polozov et al., "The Conceptual Design of the 7.5 MeV/u Light Ion Injector", in Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 51-54
2. Дребезовой Н.Ф., Тумановой А.А. // Мультипакторный разряд в резонаторах-банчерах линейного ускорителя легких ионов, 2023. <https://elibrary.ru/item.asp?edn=fxqrhs>
3. Гусарова М.А., Каминский В.И., Лалаян М.В., Собенин Н.П. // Мультипакторный разряд в сверхвысокочастотных узлах и элементах ускорителей заряженных частиц. Москва, 2011.
4. M. A. Gusarova et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 599, 100 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.09.047>
5. S. Khudiyakov et al., in Proc. RuPAC 2014, Obninsk, Russia, p. 169.
6. M. A. Gusarova et al., Probl. At. Nauki Tekh., Ser.: Yad. Issled. 49 (3), 123 (2008).

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПУШКИ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Обосновано создание специализированной электронно-лучевой пушки (ЭЛП) для аддитивных технологий. Определены особенности ЭЛП относительно традиционных сварочных пушек. Описана методика математического расчета узлов управления электронным лучом. Разработана конструкция специализированной электронно-лучевой установки для аддитивных технологий мощностью 5 кВт.

A.V. GLINSKY, A.V. NEKHOROSHEV, H.M. KOZYREV, A.L. GONCHAROV  
National Research University "MPEI" (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF AN ELECTRON BEAM GUN FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES

The creation of a specialized electron beam gun (EBG) for additive technologies is justified. The features of the EBG in comparison with traditional welding methods are determined. The method of mathematical calculation of electron beam control units is described. The installation design has been developed.

Технологии аддитивного производства на сегодняшний день обладают значительным потенциалом, поскольку они позволяют создавать детали сложной формы. К ним относится электронно-лучевая двухпроводочная аддитивная технология, которая заключается в создании трехмерных объектов путем нанесения расплавленных электронным лучом металлических проволок слой за слоем. Одним из основных преимуществ этой технологии является возможность формирования различных материалов с градиентным изменением их свойств и проведения процесса в вакуумной среде, что предотвращает окисление материала.

В современном аддитивном электронно-лучевом производстве в качестве устройства для плавления материалов используются электронно-лучевые пушки (ЭЛП) спроектированные для операций сварки. Они обладают избыточным для аддитивных технологий функционалом и мощностью, что усложняет их обслуживание.

Целью работы была разработка специализированной ЭЛП для двухпроводочных электронно-лучевых аддитивных технологий в едином корпусе с механизмом подачи проволоки.

По результатам литературного обзора назначили требуемую мощность установки 5 кВт. Изучив конструкции электронно-лучевых пушек, разработали принципиальную схему установки. Для генерации электронов выбрали танталовый катод, рассчитали его геометрию и рабочую температуру из условий оптимального сочетания срока службы и плотности тока эмиссии. С использованием математического пакета COMSOL Multiphysics было изучено, как размеры конструктивных элементов электрода Винельта влияют на фокусировку ускоренных электронов. В результате была разработана оптимальная геометрия ускоряющего промежутка, которая позволяет получить минимальный размер электронного луча и снизить напряженность электростатического поля.

Следующим этапом было моделирование фокусирующе-отклоняющей системы электронного луча [1]. В результате расчёта траектории электронов, в зависимости от формируемого магнитного поля, были определены значения управляющих воздействий, позволяющих отклонять электронный луч (рис. 1), геометрия фокусирующе-отклоняющей системы и факторы, влияющие на фокусировку и о отклонение электронов. Разработаны механизм подачи проволоки и конструкция специализированной электронно-лучевой установки для аддитивных технологий мощностью 5 кВт (рис. 2).

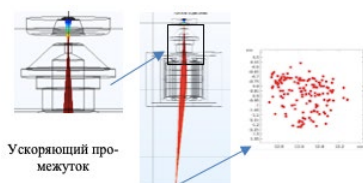


Рис. 1. Траектория отклонённых электронов

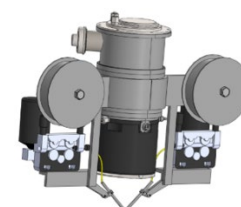


Рис. 2. Конструкция ЭЛП для двухпроводочной наплавки

Работа выполнена в НИУ «МЭИ» при выполнении НИОКР в рамках ПНИ «Приоритет 2030: Технологии будущего» на период 2022/24 гг., номер проекта пни 2022/24 -37

### Список литературы

3. Балашов В. Н., Слива А. П., Драгунов В.К. и др. Фокусирующе-отклоняющая система для электронных пушек. 2017

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЭКСТРАКЦИИ ДЛЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНОВ

В работе представлены результаты моделирования систем экстракции лазерного и ЭЦР источников ионов. На основе геометрии Пирса разработана система, состоящая из фокусирующих и ускоряющих электродов. Выполнено моделирование динамики пучков ионов в источнике.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, O.A. IVANOV, A.S. KRASNOV  
National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## PARAMETERS OPTIMIZATION AND DESIGN OF EXTRACTION SYSTEMS FOR ION SOURCES

The paper presents the results of modeling an extraction system of laser and ECR ion sources. Based on Pierce geometry, a system consisting of focusing and accelerating electrodes has been developed. The dynamics of ion beams in the source was simulated.

В работе предложена конструкция и представлены результаты численного моделирования и оптимизации систем экстракции пучка для двух видов источников легких многозарядных ионов (лазерного и ЭЦР источника). Выполнено моделирование систем экстракции пучка на основе пирсовской системы электродов. Предложенные системы основаны на оптике Пирса, предложившего для получения сходящегося пучка компенсировать пространственный заряд электрическим полем соответствующим образом выбранных электродов. Проведена оптимизация геометрических параметров электродов, предложена их конструкция с целью получения на выходе из системы пучка диаметром менее 10 мм, имеющего эмиттанс менее 0,003 мм·рад. Для ЭЦР источника рассмотрена система извлечения и фокусировки ионов с электростатической ускоряющей линзой. Рассмотрены распределения электрических полей, создаваемых вакуумными камерами экстракторов, находящихся под напряжением высоковольтных платформ источников ионов, и их влияние на параметры пучков. Предложена схема экранирования пучков от полей платформ и расположенного на них оборудования. Схема расчетной модели экстрактора ЭЦР источника и траектория протонов приведены на рис. 1, модель экстрактора и траектория ионов  $Li^{2+}$  в лазерном источнике приведены на рис. 2.

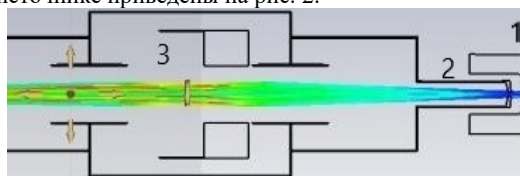


Рис. 1. Схема расчетной модели экстрактора и траектория протонов: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – блок электродов электростатической линзы с несимметричным центральным электродом.

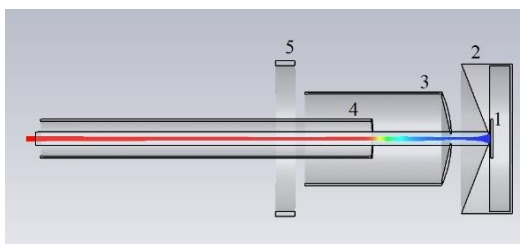


Рис. 2. Схема расчетной модели экстрактора и траектория ионов  $Li^{2+}$  после извлечения: 1 – мишень, 2 – плазменный электрод, 3 – извлекающий электрод, 4 – пролетная трубка с нулевым потенциалом, 5 – фланец вакуумной камеры с потенциалом плазменного электрода

При проведении моделирования были получены следующие значения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Параметры пучков на выходе экстракторов

Параметр	ЭЦР источник	Лазерный источник
Эмиттанс, мм·рад, не более	0,0066	0,002
Диаметр пучка, мм, не более	8	4,8

### Список литературы

1. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021». Сборник научных трудов. Москва, 23–26 марта 2021 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 388- 389.
2. Дмитриев М.С., Дьяконов М.В. Иванов О.А., Краснов А.С.// VII Международная конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2022». Сборник научных трудов. Москва, 22–25 марта 2022 года. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 324.

Е.Д. ВОВЧЕНКО<sup>1</sup>, К.И. КОЗЛОВСКИЙ<sup>1</sup>, А.А. ИСАЕВ<sup>2</sup>, Е.А. МОРОЗОВА<sup>1</sup>, А.Е. ШИКАНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА — Российский технологический университет», Москва, Россия

## ПРОЕКТ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ

Предложен проект малогабаритного импульсного генератора нейтронов с лазерным источником дейтронов с магнитной изоляцией, в котором в качестве источника ускоряющего напряжения используется модификация импульсного высоковольтного трансформатора «Тесла». При этом подавление электронной проводимости осуществляется магнитным полем, возбуждаемым в первичном контуре трансформатора. Приводятся оценки электродинамических параметров диодной системы генератора. Показана возможность осуществлять генерацию нейтронов с использованием ядерной реакции  $\text{Li}(p,n)\text{Be}$ , что открывает перспективы эффективного использования генератора нейтронов в радиационной терапии.

E.D. VOVCHEENKO<sup>1</sup>, K.I. KOZLOVSKIY<sup>1</sup>, A.A. ISAEV<sup>2</sup>, E.A. MOROZOVA<sup>1</sup>, A.E. SHIKANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>The Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «MIREA — Russian Technological University», Moscow, Russia

## PROJECT OF A HIGH EFFICIENCY SMALL-SIZED LASER NEUTRON GENERATOR

The project of a small-sized pulsed neutron generator with a laser deuteron source with magnetic isolation is proposed, in which a modification of a pulsed high-voltage Tesla transformer is used as the accelerating voltage source. In this case, the suppression of electronic conduction is performed by the magnetic field excited in the primary circuit of the transformer. Estimates of the electrodynamic parameters of the generator diode system are given. The possibility of neutron generation using the nuclear reaction  $\text{Li}(p,n)\text{Be}$  is shown, which opens up prospects for the effective use of the neutron generator in radiation therapy.

В работе [1] проведен анализ результатов, полученных сотрудниками НИЯУ МИФИ в процессе создания и исследования диодных ускорителей с лазерным источником ионов и магнитной изоляцией, реализующих технические решения, описанные в работах [2, 3]. Дальнейшее усовершенствование этих изделий предполагается осуществлять в направлении уменьшения габаритов и увеличения энергии ускоряемых дейтронов в процессе реализации технического решения [4], предложенного авторами.

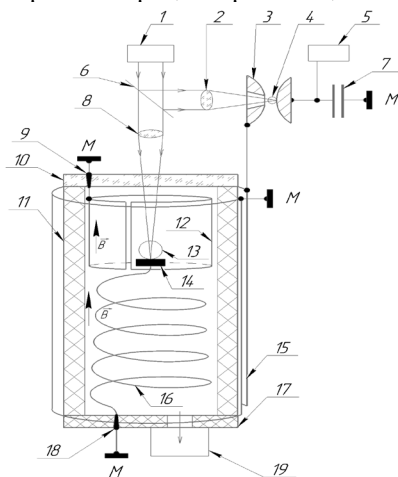


Рис. 1. Схема генератора нейтронов

На лазерную мишень 14 подается высокое напряжение от вторичной обмотки импульсного трансформатора. Дейтроны извлекаются из плазмы и ускоряются к мишени 12, где происходит генерация нейтронов. Электронная проводимость диодной системы эффективно подавляется магнитным полем, возбуждаемым первичной обмоткой 15 импульсного трансформатора. Расчет показывает, что ускоряющее напряжение может достигать значений  $\sim 10^3$  кВ, что открывает возможность использования реакции  $\text{Li}(d,n)\text{Be}$  для генерации нейтронов с энергией, пригодных для применения в радиационно-захватной терапии онкологических заболеваний.

### Список литературы

1. Вовченко Е.Д., Исаев А.А., Козловский К.И., Левтеров К.А., Швецов В.Н., Шиканов А.Е. Сообщение ОИЯИ P13-2023-10. Дубна, ОИЯИ 2023, 18с.
2. Беспалов Д.Ф., Минц А.З., Плешакова Р.П., Шиканов А.Е. А.С. СССР №457406, 1972.
3. Беспалов Д.Ф., Козловский К.И., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. А.с. СССР, № 766048, 1979.
4. Исаев А.А., Козловский К.И., Морозова Е.А., Шиканов А.Е., Шиканов Е.А.. Патент РФ № 2813664, 2024.

И.Ю. КОКОТКИН, Д.А. ТЕРЕНТЬЕВ  
АО «НПП ТОРИЙ», Москва, Россия

## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МЕДИАНА-2 МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СИСТЕМАХ ФОКУСИРОВКИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ СВЧ ПРИБОРАХ

Приводится описание программно-аппаратного комплекса, предназначенного для измерения распределения индукции магнитного поля в пространстве пролета пучка электронов в мощных электронно-вакуумных СВЧ устройствах. Комплекс предназначен для замены используемого в настоящее время измерителя Медиана [1], используемого в технологической цепочке изготовления и настройки магнитных фокусирующих систем.

I.U. KOKOTKIN, D.A. TERYTYEV  
JSC "SPI TORIY", Moscow, Russia

## MEDIANA-2 SOFTWARE AND HARDWARE MEASUREMENT SETUP FOR MAGNETIC FIELD CHARACTERISATION IN ELECTROVACUUM RF DEVICES FOCUSING SYSTEMS

Software and hardware of measurement setup Mediana-2 is presented. This complex was developed for magnetic field distribution measurement in charged particle drift space of power RF electrovacuum tubes. It is proposed for Mediana setup [1] replacement in routine operations of focusing magnetic systems production and tuning.

Магнитные фокусирующие системы, основанные на использовании постоянных магнитов, являются одним из наиболее часто используемых решений, применяемых для контроля формы пучка электронов в электронно-вакуумных приборах СВЧ диапазона. По сравнению с фокусирующими катушками при сравнимой эффективности они не требуют источника питания и позволяют повысить общий КПД устройства в большинстве случаев.

Основная проблема при изготовлении магнитной фокусирующей системы, основанной на постоянных магнитах, состоит в том, что она должна иметь четко нормируемые характеристики, определяемые на этапе проектирования прибора и расчёта динамики пучка. Естественный разброс в параметрах отдельных магнитов должен быть скомпенсирован настройкой магнитной системы при изготовлении. Для решения этой задачи был спроектирован и создан автоматизированный измерительный комплекс, предназначенный для проведения измерений продольной и поперечной компонент постоянного магнитного поля.

Комплекс предназначен для замены активно используемого в настоящее время «Медиана», разработанный относительно давно и не удовлетворяющий критериям удобства перемещения и использования в силу своих массо-габаритных характеристик, так как представляет собой стойку. Основным требованием к новой системе является мобильность и реализация всех возможностей существующей измерительной аппаратуры при существенно меньших габаритах комплекса.

Общая структурная схема аппаратной части комплекса приведена на рис. 1а. Для измерения индукции магнитного поля используются первичные преобразователи типа ПХЭ-118, основанные на эффекте Холла, сигнал с которых усиливается и оцифровывается электроникой с минимальным уровнем собственных шумов перед передачей в управляющий компьютер. Пример измерения распределения магнитного поля вдоль оси проверенного эталона магнитного поля приведён на рис. 1б. Полученные результаты тестирования измерительного комплекса Медиана-2 позволяют судить о корректности получаемых с его помощью данных в пределах допустимого уровня погрешностей измерения порядка 1-2%.

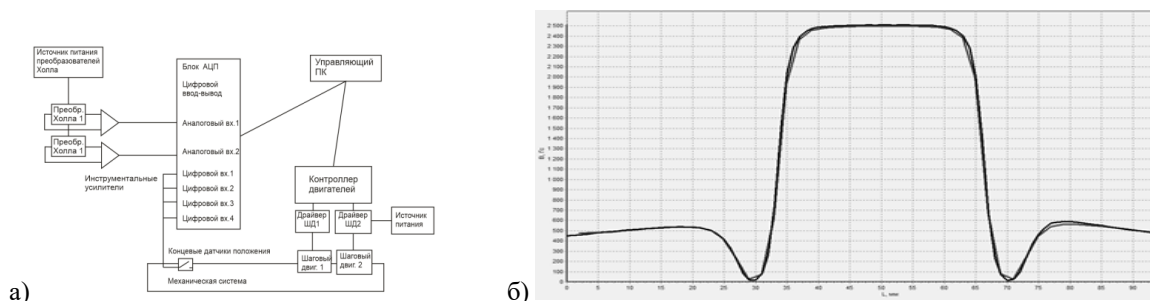


Рис. 1. Измерительный комплекс Медиана-2:

а-структурная схема, б-измеренное распределение индукции магнитного поля эталонного магнита, выполненное на Медиане и Медиане-2

### Список литературы

1. Лаврентьев Ю.В. Методика приближенного расчета составляющих индукции трехмерного магнитного поля. Электронная техника. Электроника СВЧ, вып. 2(426), 1990

## РАЗРАБОТКА ЦИЛИНДРА ФАРАДЕЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ С ЭНЕРГИЯМИ 5 КЭВ И 7 МЭВ

Разработан цилиндр Фарадея для линейного ускорителя электронов на энергию 5 кэВ и 7 МэВ с токами 20 мА и 6 мкА соответственно. Приведена оптимальная конструкция цилиндров для получения наименьшего вылета вторичных электронов. Приведены значения токов и рассмотрены альтернативные более простые конструкции.

M.S. DMITRIEV, M.V. DYAKONOV, A.S. KRASNOV  
 National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF THE FARADAY CUP FOR ELECTRON BEAMS WITH ENERGIES OF 5 KEV AND 7 MEV

A Faraday cup has been developed for a linear electron accelerator with an energy of 5 keV and 7 MeV with currents of 20 mA and 6 μA, respectively. An optimized cylinder design is presented to obtain the minimal secondary electrons escape. The values of the currents are given and alternative simpler designs are considered.

Выбрана конструкция и проведена оптимизация размеров цилиндров Фарадея, предназначенных для измерения токов электронных пучков с энергиями 5 кэВ и 7 МэВ и токами 20 мА и 6 мкА соответственно. Большинство вторичных электронов имеют энергию ниже 20 эВ, но также появляются высокоэнергетические обратно рассеянные электроны с энергиями до 100 эВ.

Исследовано влияние напряжения на запирающем электроде на ток вылетающих из цилиндра Фарадея вторичных электронов. Построены зависимости тока от напряжения запирающего электрода.

Рассмотрена конструкция с классическим цилиндром Фарадея для ускорителей на энергию 5 кэВ и 7 МэВ с токами 20 мА и 6 мкА и диаметром пучка 4 мм, представленная на рис. 1.

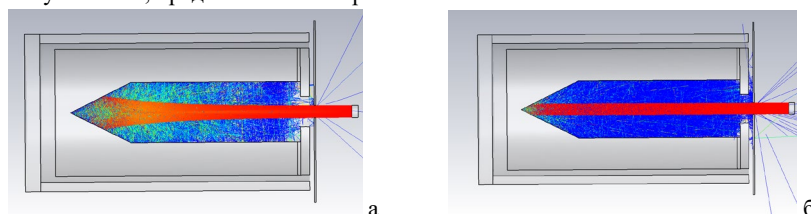


Рис. 1. Классические цилиндры Фарадея с рассчитанной траекторией частиц на энергию 5 кэВ (а) и 7 МэВ(б)

Ток вылетевших электронов  $I_v$  в данных конфигурациях составил 0,58 мА для 5 кэВ и 1 мкА для 7 МэВ, что является большими значениями относительно требуемой точности в 5%.

На рис. 2 представлена более оптимальная конструкция цилиндров, которая обеспечивает удержание подавляющего большинства ионов при помощи дополнительной горловины для левой модели(а) и удлиненного стакана для правой (б).

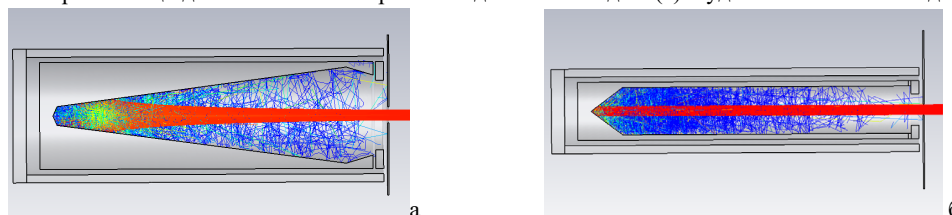


Рис. 2. Оптимизированные цилиндры Фарадея с рассчитанной траекторией частиц на энергию 5 кэВ (а) и 7 МэВ(б)

Ток вылетевших электронов в данных конфигурациях составил около 0,27 мА для 5 кэВ и 0,2 мкА для 7 МэВ, что является существенным улучшением параметров датчиков по сравнению со стандартным вариантом. Сравнение результатов приведено в табл. 1.

Таблица 1. Сравнение тока вылетевших электронов в моделях цилиндра Фарадея

	$I_v$ , мА	% от начального тока
5 кэВ классический	0,58	3
7 МэВ классический	0,001	16
5 кэВ оптимизированный	0,27	1,35
7 МэВ оптимизированный	0,0002	3,3



А.В. МАКАРОВ, В.И. РАЩИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУЧКА В ЭЦР ИСТОЧНИКЕ КОДОМ WARP

Рассмотрена динамика пучка в источнике многозарядных ионов использующим электрон-циклотронный резонанс. Моделирование выполнено PIC (Particle In Cell) кодом WARP. Исследовано влияние конструкции инжектора на выходные пучки.

A.V. MAKAROV, V.I. RASHCHIKOV

National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## BEAM DYNAMICS SIMULATION IN ECR SOURCE BY CODE WARP

Beam dynamics simulation in multicharged ion source using electron-cyclotron resonance is considered. The simulation is performed by PIC (Particle In Cell) WARP code. The effect of the injector design on the output beams is investigated.

Одним из перспективных источников многозарядных ионов для ускорителей заряженных частиц является источник на электрон-циклотронном резонансе (ЭЦР). Одной из основных трудностей, возникающих при проектировании подобных источников, является корректный расчет динамики пучка с большим зарядом и нерелятивистской энергии, приводящей к необходимости учета его собственного поля. Часто, для упрощения решения, расчет поля пространственного заряда пучка выполняется в собственной системе координат пучка, с обратным переходом в лабораторную систему координат, используя преобразования Лоренца. Использование подобного подхода в ионных источниках весьма проблематичен (разноскоростное движение), в силу чего в подобных задачах необходимо решать задачу в лабораторной системе координат. Подобное решение можно получить, используя PIC код WARP [1].

В настоящей работе исследовалась динамика ионного пучка в ЭЦР источнике, разрабатываемого на кафедре Электрофизических установок МИФИ в рамках договора по созданию линейного ускорителя-инжектора для ионного синхротрона на энергию около 400 МэВ/нуклон.

Геометрия вытягивающих электродов плазменной камеры, электростатической линзы и распределение электрического поля (картина эквипотенциалей) представлены на рисунке 1.

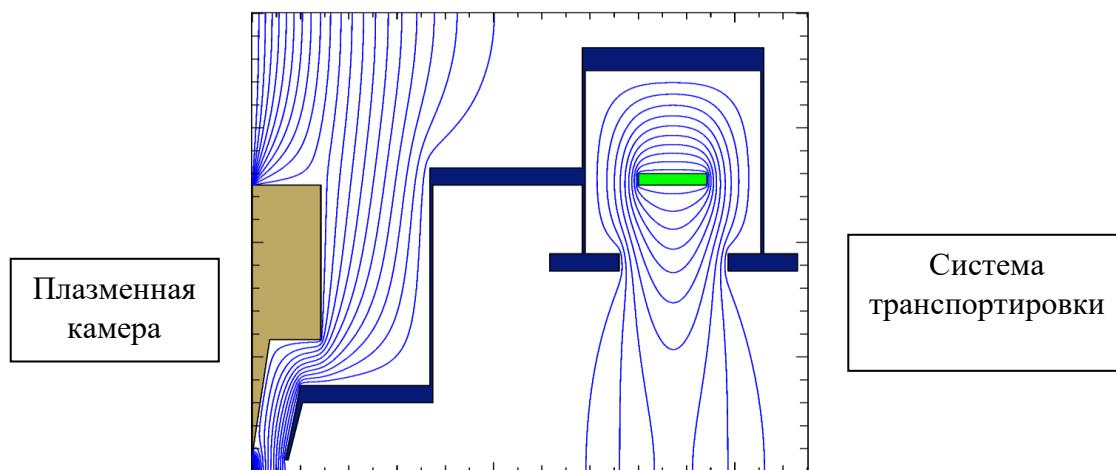


Рис. 1. Геометрия вытягивающих электродов плазменной камеры, электростатической линзы и распределение электрического поля (картина эквипотенциалей)

Результаты моделирования динамики пучка в ЭЦР позволили получить необходимые для дальнейшего расчета выходные параметры, такие как энергетический спектр, эмиттанс и т.д.

### Список литературы

1. Warp, Mar. 2014, [online] Available: <http://warp.lbl.gov/>.

А.А. МАЛЫШЕВ, А.В. КОЗЛОВ, Е.Д. ЦЫПЛАКОВ  
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

## ДИПОЛЬНЫЕ МАГНИТЫ КАНАЛОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПРОТОННОГО СИНХРОТРОНА

Представленная работа посвящена созданию физических моделей дипольных магнитов [1], предназначенных для использования в каналах транспортировки протонного пучка с низкой и высокой энергией в составе протонного синхротрона. Изложены результаты моделирования объёмных распределений магнитного поля [2] в среде CST Studio и промежуточные этапы моделирования теплового режима в условиях водяного охлаждения в Comsol MP.

A.A. MALYSHEV, A.V. KOZLOV, E.D. TSYPLAKOV  
National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

## DIPOLE MAGNETS IN BEAM TRANSPORT CHANNELS OF THE PROTON SYNCHROTRON

The presented study is devoted to the development of physical models of dipole magnets [1] for low- and high-energy beam transport channels of the proton synchrotron and includes detailed results of magnetic field simulation [2] in the CST Studio environment and intermediate stages of thermal modeling using Comsol Multiphysics.

На текущий момент в НИЦ «Курчатовский институт» ККТЭФ ведётся разработка магнитных элементов для компоновки каналов транспортировки бустерного и основного кольца синхротрона, предназначенного для прикладных физических исследований, с выходной энергией протонного пучка более десяти МэВ. Представлены результаты численного моделирования средствами CST Studio для нескольких моделей магнитов, один из которых будет использоваться в бустерном кольце, для отклонения низкоэнергетичного пучка, а другой – для отклонения пучка высокой энергии в основном синхротроне. Основное внимание уделяется оптимизации конструктивных элементов магнитопровода, анализу «области хорошего поля» (GFR) в обеих конструкциях, а также этапам гидравлического и теплового расчёта при помощи встроенных модулей среды Comsol MP.

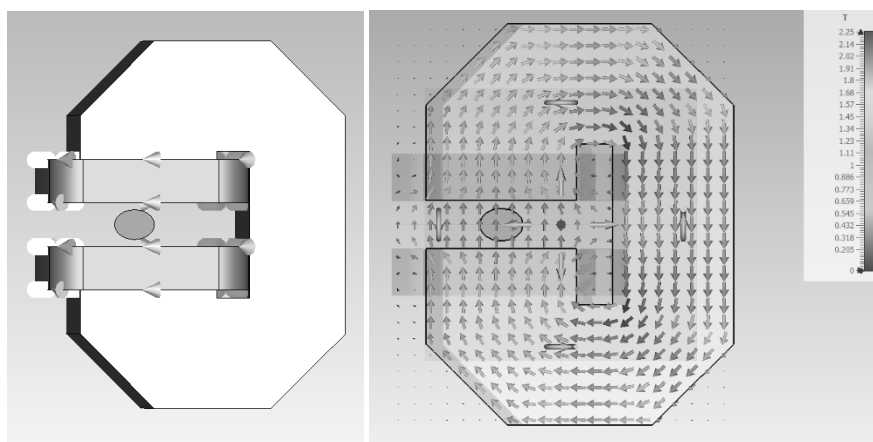


Рис. 1. Физическая модель С-образного дипольного магнита для бустерного кольца (слева) и объёмное распределение магнитного поля в его поперечном сечении (справа)

### Список литературы

1. S. Terner, Cern Accelerator School, Fifth general accelerator physics course, "Proceedings Vol.II" September 9-18,1992, University of Jyvaskyla, Finland, pp.875-880
2. Th. Zickler, "Basic design and engineering of normal-conducting, iron-dominated electromagnets", CERN Accelerator School CAS 2009: Specialised Course on Magnets, pp. 91-94, Bruges, June 2009.

И.Ю. НИКОЛАЙЧУК, Г.С. СЕДЫХ, В.Л. СМIRНОВ, М.М. ШАНДОВ

*Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

## ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ В СИНХРОТРОНЕ

Представлены ключевые особенности разработки программного обеспечения коррекции замкнутой орбиты пучка в ускорительных комплексах синхротронного типа на примере бустерного синхротрона комплекса NICA. При создании программного комплекса применены методы, позволяющие универсализировать программный продукт для широкого применения в системах коррекции орбиты.

I.Yu. NIKOLAICHUK, G.S. SEDYKH, V.L. SMIRNOV, M.M. SHANDOV

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

## FEATURES OF SYNCHROTRON BEAM ORBIT CORRECTION SOFTWARE

The paper describes basic features of software development for beam orbit correction in synchrotron-type acceleration complexes using the example of the NICA complex booster synchrotron. Multi-purpose methods were used for general application in beam orbit correction systems.

Коррекция замкнутой орбиты пучка в синхротроне является одной из основополагающих задач для достижения проектных параметров установки. Система коррекции состоит из корректирующих магнитов (корректоров) и мониторов положения пучка (МПП). Задача коррекции орбиты состоит в создании связи между корректорами и МПП с целью минимизации отклонений орбиты от требуемых значений. Расчёт необходимых сил корректоров производится специализированными алгоритмами с параметрами, рассчитываемыми индивидуально для каждой установки.

Система управления комплекса NICA реализована на базе объектно-ориентированной системы Tango Controls [1], что позволяет создавать программные устройства, имеющие одинаковый функционал. Главным преимуществом данного подхода, в случае системы коррекции орбиты, является идентичность Tango-устройств корректоров и МПП, вне зависимости от их аппаратной реализации. Такое построение системы управления позволяет универсализировать способы взаимодействия с устройствами.

Выбор установки в ПО коррекции орбиты происходит путём загрузки соответствующего конфигурационного файла в формате JSON [2]. Конфигурационный файл содержит в себе описание структуры системы коррекции и адреса устройств в системе управления для взаимодействия с ними. Данный подход позволяет использовать одно ПО для управления различными ускорителями синхротронного типа.

Автоматическая коррекция орбиты основана на алгоритме расчёта токов питания корректоров при помощи матрицы отклика орбиты. Матрица отклика орбиты представляет собой набор величин отклонения пучка в местах расположения МПП в зависимости от воздействия соответствующего корректора. Используя методы обращения матриц, можно рассчитать требуемые величины токов корректоров для минимизации возмущений орбиты.

Для реализации динамической (во всём цикле ускорения) коррекции орбиты был создан алгоритм задания тока в корректорах пропорционально ведущему магнитному полю. С целью минимизации переходных процессов источников тока в паузе между циклами ускорения устанавливается статическое значение тока, соответствующее величине тока на энергии инжекции. Коэффициент пропорциональности определяется, исходя из значений тока корректора на энергии инжекции, рассчитываемых при помощи вышеописанного алгоритма.

При коррекции орбиты во всём диапазоне энергий метод динамической пропорциональной коррекции может быть недостаточно точен если присутствует рассогласование частоты ускоряющей ВЧ системы и ведущего магнитного поля. Для этого показания МПП усредняются за установленный временной промежуток в течение цикла ускорения. Затем рассчитываются токи корректоров для каждого интервала. После чего линейной интерполяцией полученных значений формируется импульс тока. При этом во избежание возникновения переходных процессов участки резкого изменения тока заменяются параболой.

Первая версия ПО коррекции орбиты разработана и успешно протестирована в ходе сеансов пусконаладочных работ с пучком на инжекционном комплексе коллайдера NICA. Впервые на комплексе была произведена динамическая коррекция орбиты.

### *Список литературы*

1. Andreev V. et al. NICA Booster control and diagnostics system. Phys. Part. Nuclei Lett. 17, 574–577 (2020).
2. Введение в JSON. <https://www.json.org/json-ru.html>

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Рассмотрены существующие системы термостабилизации и охлаждения используемые в медицинских и промышленных линейных электронных ускорителях. Выполнена оценка расхода охлаждающей жидкости для термостабилизации ускоряющих структур линейных ускорителей электронов. Разработаны схемы систем термостабилизации медицинского ускорителя электронов и промышленного ускорителя. Подобрана элементная база для создания системы для компоновки системы в стандартном телекоммуникационном шкафу. Выполнена сборка системы термостабилизации и проведены технические испытания системы термостабилизации и охлаждения для медицинского ускорителя.

M.S. DMITRIEV, A.V. PROKOPENKO, S.A. SMIRNOV  
*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*  
**DEVELOPMENT OF THERMAL STABILIZATION AND COOLING SYSTEMS  
FOR LINEAR ELECTRONIC ACCELERATORS**

The existing thermal stabilization and cooling systems used in medical and industrial linear electronic accelerators are considered. The estimation of coolant consumption for thermal stabilization of accelerating structures of linear electron accelerators has been performed. Schemes of thermal stabilization systems for medical electron accelerator and industrial accelerator have been developed. The element base has been selected to create the thermal stabilization system in standard telecommunications cabinet. The thermal stabilization system was assembled and technical tests of the thermal stabilization and cooling system for medical electron accelerator were carried out.

Проведен анализ существующих систем термостабилизации и охлаждения применяемых в линейных ускорителях электронов на энергии от 3 МэВ до 10 МэВ. Современные системы охлаждения характеризуются компактностью, высоким уровнем автоматизации при работе в различных режимах и использованием замкнутых контуров охлаждения. Термостабилизация ускоряющих структур и элементов волнового тракта необходима для поддержания установленной резонансной частоты и возможности её регулировки в диапазоне от 30 °С до 60 °С. Смещение резонансной частоты в ускоряющих структурах может лежать в пределах от 20 кГц/град до 300 кГц/град, что дает возможность осуществить перестройку частоты температурой воды. Подстройка рабочей частоты ускоряющей структуры за счет изменения температуры и скорости протока охлаждающей воды в кожухах. Система термостабилизации должна обеспечивать постоянство  $[\pm 0,5^\circ\text{C}]$  рабочей температуры ускоряющей секции, волноводов, эффективное охлаждение мишени и поддержание рабочих температур энергонагруженных систем основного и вспомогательного уровня. К системам основного уровня относятся ферритовые вентили, импульсные генераторы клистроны и магнетроны, вакуумные окна, магнитные системы клистронов и фокусирующие соленоиды и линзы. К системам вспомогательного уровня относятся модуляторы, вакуумные насосы, блоки питания насосов источники питания.

В работе выполнены оценки необходимого расхода охлаждающей жидкости для термостабилизации ускоряющих структур линейных медицинских и промышленных ускорителей, а так же экспериментального образца электронной пушки с фотокатодом. Проведенная оценка максимальной мощности потребляемой этими линейными ускорителями электронов и на основании уравнения теплового баланса определены расходы охлаждающей жидкости чтобы разница температур на входе и выходе узла ускорителя не превышала 0,5 °С, 1 °С, 1,5 °С, 2,0 °С. На основе полученных данных выбраны модели насосных агрегатов с заданными производительностями. Так же проанализированы конструкции ускоряющих структур и даны рекомендации по совершенствованию контуров охлаждения ускоряющих систем. линейных медицинских и промышленных ускорителей, а так же экспериментального образца электронной пушки с фотокатодом

В работе представлена разработка замкнутых систем термостабилизации и охлаждения линейных медицинских и промышленных ускорителей. Представленные системы являются двухконтурными с теплопередачей через пластинчатый теплообменник. Во внешнем контуре системы в качестве источника холода используется воздушно охлаждаемый промышленный чиллер с мощностью охлаждения до 35 кВт. Система термостабилизации работает в режимах включения установки при прогреве, поддержания готовности ускорителя к работе, работы ускорителя и режиме окончания работы. Все составные части линейного ускорителя электронов будут охлаждаться через внутренний контур деионизованной водой с сопротивлением не хуже 1 МОм. Внутренний контур системы будет включать в себя водяной циркуляционный насос с частотным регулированием, накопительный бак, пластинчатый теплообменник, впускные и выпускные коллекторы, регуляторы расхода воды, датчики температуры, расходомеры. Внутренний контур работает при атмосферном давлении.

Проведены работы по комплектации системы термостабилизации и охлаждения для медицинского линейного ускорителя электронов. Накопительно-смесительный бак оснащался тепло электрическим нагревателем на 3 кВт для подготовки ускоритель к работе. Внешний контур охлаждения системы термостабилизации подключается к чиллеру Delta ZMA1021-PAC2-XV компании «Дельта-Холод». Выполнена сборка системы термостабилизации в телекоммуникационном шкафу и проведены технические испытания системы.

Д.Н. СЕЛЕЗНЕВ, А.Б. ЗАРУБИН, Н.Н. ВИНОГРАДСКИЙ, К.Е. ПРЯНИШНИКОВ,  
П.А. ФЕДИН, Т.В. КУЛЕВОЙ

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия*

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывает источник ионов электронного циклотронного резонанса (ECR) для многолучевой установки для проведения экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов для ядерных и термоядерных реакторов. Для воспроизведения процессов, происходящих в реакторе, необходимо облучать образцы конструкционных материалов двумя или тремя ионными пучками [1]. Тяжелые (Fe) и легкие (H/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается компактный ионный источник с разрядной камерой на основе запредельного волновода для установки на высоковольтной платформе. Статья содержит описание конструкции источника легких ионов и предварительные результаты по генерации пучка ионов гелия.

D. N. SELEZNEV, A.B. ZARUBIN, N.N. VINOGRADSKI, K.E. PRYANISHNIKOV, P. A. FEDIN,  
T.V. KULEVOY

*National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

## LABORATORY SOURCE OF LIGHT IONS WITH A DISCHARGE CHAMBER BASED ON AN OUT-OF-LIMIT WAVEGUIDE FOR INSTALLATION ON A HIGH-VOLTAGE PLATFORM

The Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics in NRC “Kurchatov Institute” is developing an electron cyclotron resonance (ECR) ion source for a multi-beam facility for performing experiments on express analysis of the irradiation resistance of structural materials for nuclear and fusion reactors. To reproduce the processes occurring in the reactor, it is necessary to irradiate samples of structural materials with two or three ion beams [1]. Heavy (Fe) and light (H/ He) ion beams will irradiate the target in the same chamber simultaneously. The paper presents a description of the light ion source design and preliminary results of a helium ion beam generation.

Для проведения предаттестационных исследований новых конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов, востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости этих материалов. Такими методами являются имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. Для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала тремя ионными пучками. Ионы Fe используются в качестве основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования от основного пучка. В реальных условиях нейтронного облучения в результате реакций ядерной трансмутации в материалах образуются газообразные примеси: гелий и водород, которые накапливаются одновременно с накоплением радиационных дефектов [1]. В НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ ведется разработка двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр. Для генерации пучка гелия разрабатывается ионный источник легких ионов с разрядной камерой на основе запредельного волновода для установки на высоковольтной платформе. Структурная схема лабораторного источника ионов и фотография представлены на рисунке 1.

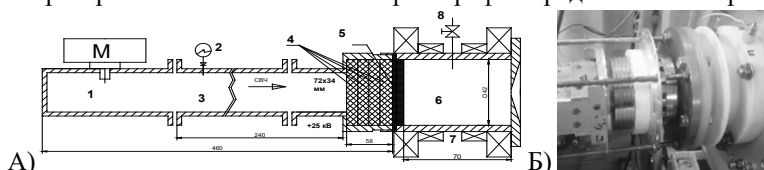


Рис. 1. А) схема лабораторного источника ионов: 1 – секция с магнетроном; 2 – диодный детектор; 3 – измерительная секция; 4 – согласующий участок с керамикой  $\epsilon=8$ ; 5 – вакуумное высокочастотное окно с нитридом бора; 6 – разрядная камера  $\varnothing 42$  мм; 7 – постоянные магниты; 8 – ввод газа. Б) Фотография ионного источника

Основные параметры ионного источника: частота СВЧ колебаний 2,45 ГГц; магнетрон LG 2M213; внутренний диаметр разрядной камеры 42 мм; рабочий газ гелий. Ускоряющее напряжение 25 кВ. Магнитное поле создано постоянными кольцами из неодимовых магнитов ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) марки N35. Величина магнитного поля на оси кольца в центре магнита достигает 1700 Гс.

Плазма в разрядной камере генерировалась импульсной СВЧ мощностью с частотой посылок до 2 Гц и длительностью импульса 400 мкс. Источник устойчиво работал при давлении в вакуумной камере  $p=2 \cdot 10^{-6}$  Торр несколько часов. Полный ток пучка, измеренный цилиндром Фарадея, равен 5 мА. Был измерен масс зарядовый состав пучка. Интенсивности ионного пучка гелия достаточно для проведения имитационных экспериментов.

### Список литературы

1. Fedin P. A. et al. Requirements for the dual Fe+ H/He beam at the accelerator HIPr for simulation of neutron influence on nuclear reactor materials //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1686. – №. 1. – С. 012073

## ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ КОМПАНИИ ELEKTA

Рассмотрены результаты численного моделирования динамики пучка заряженных частиц в термоэмиссионном источнике электронов для медицинских ускорителей ELEKTA. Получена внутренняя геометрия нового источника для соответствия динамики пучка заряженных частиц исходному источнику, а также сохранены системы питания и откачки, установленные в ускорителях.

N.Yu. SAMAROKOV, V.I. RASHCHIKOV, T.V. BONDARENKO, A.A. BATOV, R.A. ZBRUEV  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## IMPORT-SUBSTITUTE SOURCE OF ELECTRONS FOR MEDICAL ACCELERATORS OF THE ELEKTA COMPANY

The results of numerical modeling of the charged particles beam dynamics in a thermionic electron source for medical accelerators ELEKTA are considered. The internal geometry of the new source was obtained to match the dynamics of the charged particle beam to the original source, and the power supply and pumping systems installed in the accelerators were also preserved.

В работе представлены результаты численного моделирования термоэмиссионного источника электронов для импортозамещения термоэмиссионных источников, установленных в медицинских ускорителях компании ELEKTA [1, 2]. Производитель ушел с российского рынка и не проводит гарантийное обслуживание ускорителей. Аналоги, которые используются в данный момент, могут эксплуатироваться в течение года, после чего катод выходит из строя. Однако нынешняя конструкция не позволяет заменить только катод, что приводит к замене всего источника. Авторы имеют опыт создания подобных источников [3 – 5].

Разрабатываемый источник имеет косвенно накальный оксидный катод вместо прямонакального вольфрамового, что продлевает срок службы до двух лет и дает возможность замены только катода при его выходе из строя. На рисунке 1 (а) представлен общий вид исходного источника электронов ускорителей ELEKTA, на рисунке 1 (б) представлены геометрия и динамика пучка электронов нового источника электронов.

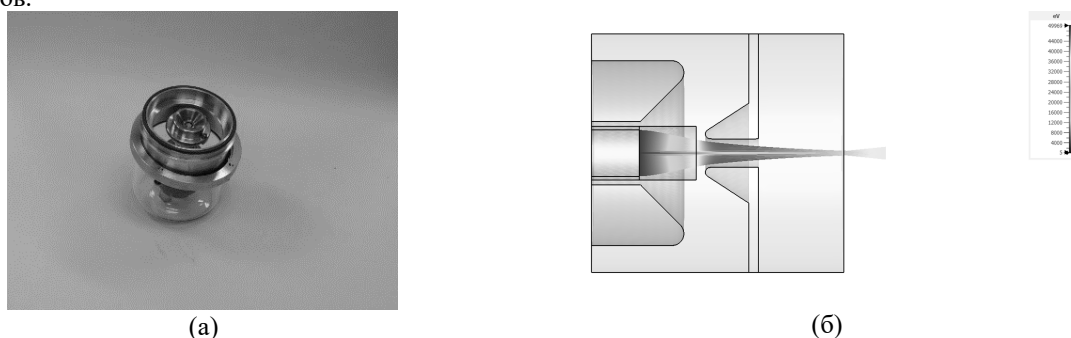


Рис. 1. (а) Общий вид исходного источника электронов ускорителей ELEKTA и (б) Геометрия и динамика пучка электронов нового источника электронов

Полученные результаты сходятся с характеристиками пучка в оригинальной пушке. Несмотря на увеличение диаметра катода и изменение его типа, данные изменения удастся внести при сохранении систем питания и откачки ускорителя, что позволит использовать данный источник «из коробки».

Работа выполнена при поддержке Фонда Содействия Инновациям, в рамках гранта «Умник – проектная команда. Электроника».

### Список литературы

1. Winkel D. et al. Adaptive radiotherapy: the Elekta Unity MR-linac concept //Clinical and translational radiation oncology. – 2019. – Т. 18. – С. 54-59.
2. Narayanasamy G. et al. Commissioning an Elekta Versa HD linear accelerator //Journal of applied clinical medical physics. – 2016. – Т. 17. – №. 1. – С. 179-191.
3. S.M. Polozov, V.I. Rashchikov and M.I. Demsky, Beam dynamics in new 10 MeV high-power electron linac for industrial application, Proceedings of the XXV Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2016). 2017. С. 493-495. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2016-WEPSB057
4. Samarokov N. Y. Optimization of Cathode Electrode Geometry //Physics of Atomic Nuclei. – 2023. – Т. 86. – №. 10. – С. 2271-2274.
5. Basył D. S. et al. New 10 MeV high-power electron linac for industrial application //IPAC 2016-Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference. – 1794. – Т. 1796.

## РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ УНИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКОВ КОМПЛЕКСА У-1.5

Быстроциклирующий синхротрон У-1.5 – бустер ускорителя У-70. Он является основой для реализации физических программ, как источник протонного и углеродного ускоренных пучков. Широкий диапазон рабочих интенсивностей пучка требует создания новой системы измерения интенсивности обоих типов частиц, как в кольце бустера, так и в каналах ввода/вывода. В данной работе приведены результаты разработки системы, основанной на использовании трансформаторов тока в качестве мониторов. Показано расположение датчиков, их назначение и сформулированы основные требования к ним.

A.A. SUSLENKOV, K.A. SUKHOV, V.I. TEREKHOV  
National Research Center «Kurchatov Institute - IHEP», Protvino, Russia

## DEVELOPMENT OF AN UPGRADED UNIFIED BEAM INTENSITY MEASUREMENT SYSTEM OF THE U-1.5 COMPLEX

The U-1.5 fast-cycling synchrotron is a booster of the U-70 accelerator. It is the basis for the implementation of physical programs, as a source of proton and carbon accelerated beams. The wide range of operating beam intensities requires the creation of a new system for measuring the intensity of both types of particles, both in the booster ring and in the input/output channels. This paper presents the results of the development of a system based on the use of current transformers as motors. The layout and designated purposes of the monitors are given and the basic requirements for them are formulated.

Бустер ИФВЭ – Быстроциклирующий протонный синхротрон У-1.5, являясь инжектором пучков протонов и ядер углерода в кольцевой ускоритель У-70[1], как автономная машина позволяет реализовать ряд новых физических программ. Этот факт диктует необходимость в использовании расширенного диапазона рабочих интенсивностей циркулирующего пучка в ускорителе У-1.5 от  $5 \times 10^{10}$  до  $5 \times 10^{12}$  протонов и от  $1,5 \times 10^8$  до  $5 \times 10^9$  ионов  $C^{6+}$ . Существующая система измерения интенсивности пучка не обеспечивает необходимые метрологические характеристики, такие, как динамический диапазон, временное разрешение и погрешность. Это обстоятельство вызывает необходимость в создании качественно новой измерительной системы на основе современных программно-аппаратных средств, позволяющей в условиях значительного уровня электромагнитных помех перекрыть приведенный выше диапазон с точностью не хуже 2% с высокой долговременной стабильностью. В работе изложены результаты проектирования модернизированной единой системы измерения интенсивности комплекса У-1.5 [2] на основе ряда трансформаторов тока (ТТ) в качестве датчиков, расположение которых показано на рис.1. Все ТТ за исключением ТТ3 являются импульсными трансформаторами. ТТ3 выполнен по конфигурации трансформатора постоянного тока (ТПТ).

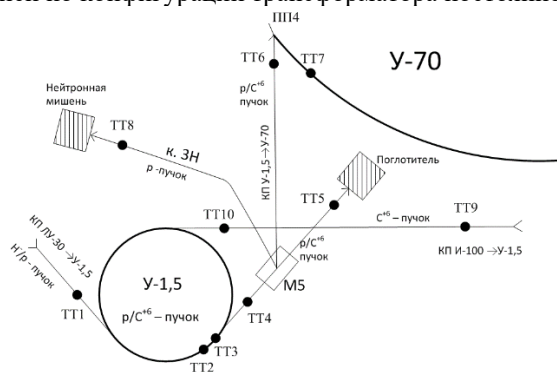


Рис.1. Размещение датчиков интенсивности на участках ускорительного комплекса У-1,5

Данная система покрывает широкий спектр задач:

- Измерение с высокой точностью интенсивности инжектируемых, циркулирующих и выводимых пучков (p/H<sup>+</sup>).
- Точное измерение эффективности инжекции и вывода пучков;
- Эффективность транспортировки пучков вдоль каналов;
- Эффективность ускорения пучков по циклу.

### Список литературы

1. Э.А.Мяэ, П.Т.Пашков, А.В.Смирнов. Кольцевой инжектор ускорителя ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 79-167.
2. В.И. Терехов, А.А.Суслёнков. Разработка станции измерения интенсивности циркулирующего пучка на ускорителях У-1.5 и У-70 // Сборник тезисов IX Всероссийского молодёжного научного форума с международным участием "OpenScience2022". 2022. С. 63.

## АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЗАБРОСА ВЫВОДИМОГО СГУСТКА ПУЧКА В АПЕРТУРУ СЕПТУМ МАГНИТА SM24 УСКОРИТЕЛЯ У-70

В ИФВЭ создан прототип аппаратуры для измерения радиального положения выбранного сгустка в апертуре септум-магнита SM24 при быстром выводе пучка из синхротрона У-70. Двойное измерение, непосредственно перед выводом и в момент вывода, позволяет определить величину заброса сгустка в апертуру септума со случайной погрешностью не хуже 0.5 мм. В данной презентации рассмотрена аппаратура и приведены результаты тестового испытания в реальных условиях.

E.A. SYSHCHIKOV, I.V. IVANOVA, V.I. TEREKHOV  
 National Research Center «Kurchatov Institute» - IHEP, Protvino, Russia

## EQUIPMENT FOR MEASURING THE KICK STRENGTH OF THE EXTRACTED BUNCH INTO THE APERTURE OF THE SEPTUM MAGNET SM24 AT U-70 ACCELERATOR

A prototype equipment for measuring the radial position of the chosen proton bunch upstream of the septum magnet SM24 during the fast extraction at IHEP. The double measurement, made immediately before and at the time of the extraction, allows us to determine the amount of the kick strength into the aperture of the septum magnet with RMS deviation of less than 0.5 mm. In this presentation the equipment is reviewed and the results of a test in real conditions are presented.

Эффективность быстрого вывода (БВ) определяется в значительной мере положением центра тяжести (ЦТ) отклонённого сгустка в апертуре септум-магнита SM24, 1-го элемента в цепочке отклоняющих септум-магнитов при БВ [1]. Эта величина определяется суммарной силой бампа и кикер-магнита KM16. Для оптимизации оперативной настройки вывода представляется целесообразным контролировать не только положение ЦТ отклонённого сгустка в апертуре, но и величину его заброса, т.е. силы кика. Величина заброса пучка  $D$  в апертуру SM24 определяется как разность положений ЦТ одного и того же сгустка непосредственно до вывода  $P$  и возбужденного KM16 в момент вывода  $P_0$ , т.е.  $D = P - P_0$  [мм]. Положение ЦТ вычисляется по результатам измерений уровней сигналов с электродов А и В двухэлектродного электростатического датчика положения PU24, установленного в прямолинейном промежутке ПП24 перед SM24:

$P_- = \{(V_A^- - V_B^-)/(V_A^- + V_B^-)\} \cdot k$ ;  $P_0 = \{(V_A^0 - V_B^0)/(V_A^0 + V_B^0)\} \cdot k$ , где  $V^-$  – напряжения на электродах до и в момент вывода,  $k$  – геометрический фактор, для PU24  $k=100 \pm 1.0$  мм.

Обработка сигналов с электродов осуществляется в двухканальной электронной аппаратуре. Упрощенная блок-схема одного канала представлен на рис.1. Электроды PU24 нагружены непосредственно на широкополосный коаксиальный кабель РК75-7-11, при этом сигналы сильно дифференцированы с постоянной времени 8нс. Для облегчения обработки использовано восстановление их формы с помощью пассивных RC цепочек с постоянной времени 110нс. Восстановленный по форме сигнал через восстановитель постоянной составляющей (ВПС) поступает на два направления, соответствующим до и в момент вывода. Пропущенный через быстрый линейный ключ (БЛК), стробируемый импульсом длительностью 165нс, регистрируемый одиночный сигнал интегрируется и подается на схему выборки-хранения. Дальнейшая обработка сигналов и отображение информации осуществляется средствами LabView. На рис.2 дан результат измерения при реальном БВ.

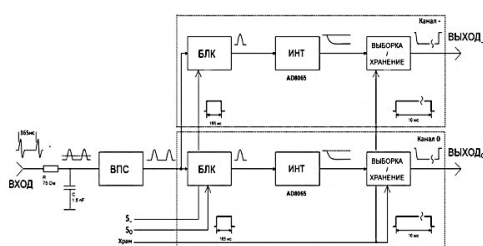


Рис. 1. Упрощенная блок-схема измерительного канала для одного электрода

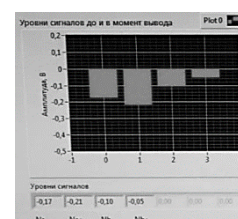


Рис.2. Результат измерения

### Список литературы

1. Афонин А.Г., Дианов В.И., Максимов А.В., Оптимизация схемы вывода протонного пучка из У-70, Препринт ИФВЭ 92-121 ОКУ.



## **УЧЕБНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ**

На кафедре Электрофизические установки НИЯУ МИФИ проведена модернизация учебно-исследовательской лаборатории Вакуумная техника. Основной задачей лаборатории является практическое ознакомление и приобретение базовых навыков работы с вакуумными системами, являющимися неотъемлемой частью электрофизических установок. Лабораторные вакуумные стенды собраны на основе современного вакуумного оборудования и снабжены компьютерной техникой для управления и контроля работы установок.

S.M. POLOZOV, M.A. SOLOMATIN, V.L. SHATOKHIN  
*National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*  
**EDUCATIONAL LABORATORY OF VACUUM TECHNOLOGY**

At the Department of Electrophysical Installations of NRNU MEPhI the modernization of the educational and research laboratory Vacuum Technology was carried out. The main task of the laboratory is practical training and obtaining basic abilities to work with vacuum systems, which are an integral part of electrophysical installations. Laboratory vacuum facilities are assembled on the basis of modern vacuum equipment and are equipped with computer technology for control and monitoring of units operation.

Целью модернизации является современное материальное обеспечение лаборатории и внедрение практических элементов научно-исследовательской работы в выполнение учебных работ на вакуумных системах в составе лабораторного практикума по вакуумной технике НИЯУ МИФИ.

Вакуумная техника является общепрофессиональной дисциплиной, одной из основ и необходимых составляющих для инженерно-физических специальностей. Практически любой физический эксперимент не обходится без привлечения вакуумной техники, обеспечивающей уникальные свойства разреженной среды для областей физики высоких энергий, современных технологий, микроэлектроники, и т.д.

Лабораторный практикум по вакуумной технике предназначен для приобретения студентами практических навыков по работе с вакуумным оборудованием. Основная тематика практикума посвящена следующим базовым вопросам:

- управлению процессами откачки вакуумных систем на разных этапах вакуумирования;
- способам и особенностям измерения давления остаточного газа в разных диапазонах;
- диагностики состояния и качественного состава вакуумной среды;
- методикам регистрации и определения малых газовых потоков, степени герметичности вакуумной системы.

Проходя обучение в данном лабораторном практикуме, студенты получают возможность практического знакомства с работой на реальных физических установках.

Универсальным решением многих задач получения высокого и сверхвысокого вакуума является использование модульных систем откачки – вакуумных постов, состоящих из высоковакуумной и низковакуумной ступеней откачки с управляющей системой, контроллером. Широкое распространение получили безмасляные системы откачки на основе турбомолекулярных насосов. Для комплектации вакуумных стендов лабораторных работ также были выбраны такие решения на основе высоковакуумных откачных постов серии HiCube 80 Eco.

Отдельной задачей является вакуумметрическое обеспечение лаборатории вакуумной техники. Вакуумметр или вакуумный датчик давления - прибор, предназначенный для измерения вакуума и индикации давления в вакуумных системах и контроля точности работы вакуумного оборудования. Лабораторный практикум оснащен разными типами преобразователей, работающими по различным принципам и в разных диапазонах измерения вакуума: тепловыми, емкостными, ионизационными, магниторазрядными. Диагностика вакуума и контроль за работой вакуумной системы требуют применения различных вакуумных датчиков, отличающихся точностью, чувствительностью к разным газам, быстродействием и другими параметрами. Основным достоинством современных вакуумметров является совмещение с управляющим контроллером, а в некоторых случаях и с дисплеем.

Другой, весьма важной задачей в области диагностики вакуума является измерение парциального состава остаточного газа. Для этих целей применяются специальные приборы – газоанализаторы. Анализаторы остаточных газов представляют собой компактные масс-спектрометры. Лаборатория вакуумной техники комплектуется квадрупольным анализатором модели SRS RGA200.

Экспериментальный стенд исследования герметичности вакуумных систем создан на основе гелиевого течеискателя ТИИ-50М. Течеискатель представляет собой мобильную вакуумную установку с масс-спектрометрической камерой, настраиваемой на пик пробного газа - гелия. Изучаются устройство и принцип работы течеискателя, основные приемы течеискания, а также выполняются поиск и регистрация потоков натекания пробного газа. На входе течеискателя устанавливаются запорная арматура, соединительные элементы, вакуумметр, соединительный гибкий металлический шланг для подключения к исследуемым объектам или вакуумным системам.

## ОТКАЧКА КАНАЛА ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ОТ ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Канал транспортировки пучка ионов низкой энергии (LEBT) предназначен для обеспечения сведения пучков ионов от разных источников ионов (ИИ) до ускоряющей структуры. Должны обеспечиваться условия прохождения пучков ионов разного типа и зарядностей, сильно отличающихся по взаимодействию с разреженной газовой средой. Моделирование вакуумной системы канала транспортировки выполнено с целью выбора конфигурации и параметров вакуумных насосов с учетом режимов работы ионных источников.

A.S. PANISHEV, S.M. POLOZOV, V.L. SHATOKHIN  
National Research Nuclear University «MEPhI» (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PUMPING OF THE BEAM TRANSPORTATION CHANNEL FROM THE ION SOURCE

The Low Energy Beam Transport (LEBT) channel is designed to ensure that ion beams from different ion sources are transported to the accelerating structure. Conditions for the transmission of ion beams of different types and charges, which differ greatly in their interaction with the rarefied gas medium, must be provided. Modeling of the vacuum system of the transport channel is done in order to select the configuration and parameters of vacuum pumps taking into account the operation modes of ion sources.

Канал транспортировки низкой энергии (LEBT) представляет собой разветвленную структуру каналов с внутренним диаметром 60 мм, соединяющую ИИ, блоки диагностики пучка, камеру поворотного магнита, резонатор-группирователь (рис. 1). Ранее рассматривались варианты импульсной подачи газа в источник

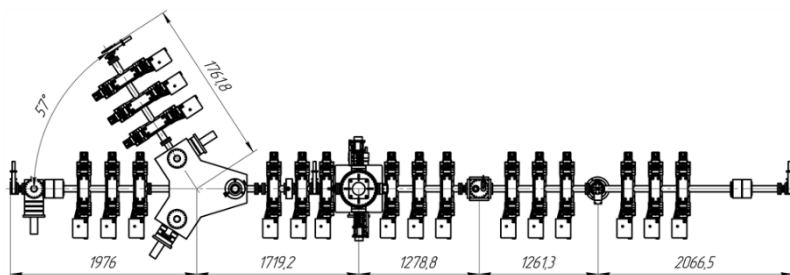


Рис. 1. Схема тракта LEBT

ЭЦР [1]. Однако такой вариант представляет определенные технические трудности и нужно использование прецизионного оборудования газонапуска. В данной работе оценивалась возможность работы установки в режиме постоянного потока рабочего газа в ИИ. Моделирование также проводилось с применением программы Molflow+ [2].

Выполнен расчет давления в канале LEBT с учетом работы разных ИИ и разных схем включения 7 насосов ТМН 700 л/с (рис. 2). Расчет откачки производился в следующей конфигурации: тепловая десорбция камеры  $10^{-9}$  мбар·л/с на  $\text{см}^2$ , постоянная нагрузка водородом и гелием от ЭЦР  $2,6 \cdot 10^{-2}$  мбар·л/с, что примерно соответствует максимально возможным генерируемым ионным токам десятки мА.

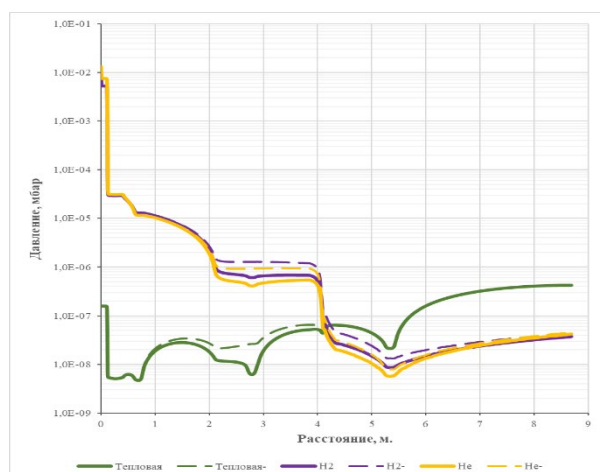


Рис. 2. Графики давления вдоль LEBT

Производительность ТМН при работе ИИ берется по паспортным данным для рабочих газов источников.

Оптимизированы схемы размещения насосов вдоль тракта и на камере диполя, в том числе и с учетом повышенного газовыделения со стороны коллиматора пучка. Давление остаточного газа за счет тепловой десорбции находится на требуемом уровне  $10^{-5}$  Па. В таких условиях потери многозарядных ионов из лазерного источника в тракте составят допустимые единицы процентов. Газовая нагрузка от ЭЦР наиболее заметна, но дана максимальная оценка. Реальное давление будет ниже, также планируется использовать ТМН с высокой производительностью по легким газам.

### Список литературы

1. Polozov, S.M., Panishev, A.S., Shatokhin, V.L. (2021). Optimization of accelerators vacuum structures pumping. 10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC10.
2. Molflow+ A Monte-Carlo Simulator package developed at CERN/<https://molflow.web.cern.ch/content/about-molflow>.

А.А. ТАУСЕНЕВ<sup>1,2</sup>, П.А. ЩЕГЛОВ<sup>1</sup>, М.В. ЧАЩИН<sup>1</sup>, А.В. ЛАЗАРЕВ<sup>2</sup>,  
Т.А. СЕМЕНОВ<sup>1</sup>, М.М. НАЗАРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр "Курчатовский Институт", Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ГАЗО-КЛАСТЕРНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СПЕКТРОМ УСКОРЕННЫХ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследованы способы управления с помощью параметров газо-кластерной струи (состав струи, диаметр и концентрация кластеров, средняя плотность плазмы) и лазерного импульса (чирпу, положение перетяжки) энергетическим спектром электронов, ускоренных в лазерной плазме. Получены экспоненциальные спектры электронов МэВ-ного уровня для двух атомарных газов (криптон, аргон) и молекулярного газа (азот).

A.A. TAUSENEV<sup>1,2</sup>, P.A. SHEGLOV<sup>1</sup>, M.V. CHASCHIN<sup>1</sup>, A.V. LAZAREV<sup>2</sup>,  
T.A. SEMENOV<sup>1</sup>, M.M. NAZAROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

<sup>2</sup>M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## OPTIMIZING THE COMPOSITION OF A GAS CLUSTER TARGET TO CONTROL THE SPECTRUM OF ELECTRONS ACCELERATED IN A LASER PLASMA

Methods for controlling the energy spectrum of electrons accelerated in a laser plasma using the parameters of a gas-cluster jet (jet composition, diameter and concentration of clusters, average plasma density) and a laser pulse (chirp, waist position) have been studied. Exponential spectra of MeV-level electrons were obtained for two atomic gases (krypton, argon) and a molecular gas (nitrogen).

Газо-кластерные струи являются перспективной средой для ускорения электронов до МэВ-ного уровня энергий в плазме, созданной при воздействии лазерных импульсов релятивистской интенсивности ( $I > 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>) [1]. Цель данной работы состоит в исследовании влияния состава газо-кластерных струй на лазерно-плазменную генерацию ускоренных электронов.

Лазерное воздействие на кластерные струи осуществлялось с помощью излучения мульти-тераваттного Ti:Sa лазерного комплекса в НИЦ «Курчатовский институт» (длительность импульсов  $\Delta t \geq 30$  фс, используемая энергия на мишени  $E = 150$  мДж, частота следования  $\nu = 10$  Гц). Фокусировка излучения осуществлялась внеосевым параболическим зеркалом с фокусным расстоянием 18 см в пятно диаметром 10 мкм, что обеспечивало релятивистскую лазерную интенсивность  $I = 5 \times 10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup>. Кластерные струи формировались в результате быстрого адиабатического расширения газа в вакуум в коническом сопле (диаметр критического сечения 0.6 мм, угол раствора 10 градусов, длина 10 мм). Для создания кластеров использовались инертные (аргон, криптон) и молекулярный (азот) газы при начальных давлениях  $P_0 = 10 - 35$  бар и комнатной температуре ( $T_0 = 298$  К). Параметры кластеров для азота, криптона и аргона были рассчитаны по модели Вайела [2]. Диаметр создаваемых кластеров для азота был  $d = 16$  нм, для криптона –  $d = 54$  нм и аргона –  $d = 44$  нм. Концентрация кластеров была на уровне  $n_d = 5 \times 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. В лазерной перетяжке средняя плотность плазмы для азота соответствовала  $n_e \approx 6 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>, для криптона –  $n_e \approx 2.4 \times 10^{20}$  см<sup>-3</sup>, аргона –  $n_e \approx 1.3 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Пучки МэВ-ных электронов регистрировались на сцинтилляторе Lanex. Рассчитан и собран магнитный (длина магнитов  $z = 1.9$  см и  $B = 0.085$  Тл) спектрометр, а также создан алгоритм обработки изображений, позволяющий оценивать энергии ускоренных электронов по величине их отклонения в магнитах с регистрацией на Lanex. Выход электронов сопоставлялся с изображениями лазерных филаментов в кластерных струях, полученных с помощью макрообъектива с ПЗС-матрицей.

В результате оптимизации по чирпу импульса, положению перетяжки в неоднородной кластерной мишени процесса лазерного ускорения электронов в газо-кластерной плазме средней подкритической плотности  $n_e \approx 10^{20}$  см<sup>-3</sup> достигнут МэВ-ный уровень энергий электронов для всех трёх газов. Обнаружено, что энергетический спектр ускоренных электронов значительно зависит от типа используемого газа. Все полученные энергетические спектры ускоренных электронов имели экспоненциальный вид с температурами  $T_{Nz} = 6.3 \pm 4.5$  МэВ,  $T_{Ar} = 1150 \pm 80$  кэВ,  $T_{Kr} = 680 \pm 30$  кэВ в диапазоне регистрации 0.3 – 4.5 МэВ. Расходимость электронных пучков находилась в диапазоне 100 – 150 мрад. Наименьшая расходимость наблюдалась для азота. При этом заряд электронного пучка для азота был наибольшим и в 1.3 раза превосходил данные для аргона, и в 3.8 раза для криптона. Наибольшие значения заряда и температуры были получены для азота с наименьшим размером кластеров при их наибольшей концентрации.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.

### Список лит ерат уры

1. Mayr M. W. et al. Nonlinear wakefields and electron injection in cluster plasma //Physical Review Accelerators and Beams 23, 093501 (2020);
2. Lazarev, A.V., Semenov, T.A., Belega, E.D., & Gordienko, V.M. et al. Dynamics of expanding gas from supercritical state in conical nozzle and cluster formation. The Journal of Supercritical Fluids, 187, 105631 (2022);

**Секция**  
**ДИНАМИКА РЕАГИРУЮЩИХ СИСТЕМ И УДАРНО-**  
**ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ**  
**УСЛОВИЯХ**

Руководитель секции

– д.ф.-м.н., профессор  
Губин Сергей Александрович

Секретарь секции

– Маклашова  
Ирина Владимировна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9917

E-mail: [SAGubin@mephi.ru](mailto:SAGubin@mephi.ru), [IVMaklashova@mephi.ru](mailto:IVMaklashova@mephi.ru)

С.В. БОГОМОЛОВ, И.А. ПАНФЕРОВА

*Московский Государственный Университет им М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

## **ОДИН ТЕСТ ДЛЯ РАЗРЫВНОГО МЕТОДА ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ КОНВЕКЦИИ**

Исследуется разрывный метод частиц в применении к одномерному квазилинейному уравнению переноса и двумерному уравнению линейного переноса. В работе показаны возможности метода частиц на примере теста Кроули. В результате, было выяснено, что для достижения необходимой точности требуется на этапе предиктора выбрать в качестве способа численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений метод Рунге Кутты, вместо метода Эйлера

S.V. BOGOMOLOV, I.A. PANFEROVA

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

## **ONE TEST FOR THE DISCONTINUOUS PARTICLE METHOD IN CONVECTION PROBLEMS**

The discontinuous particle method is studied as applied to the one-dimensional quasilinear transport equation and the two-dimensional linear transport equation. The paper shows the capabilities of the particle method using the Crowley test as an example. As a result, it was found that in order to achieve the required accuracy, it is necessary to choose the Runge-Kutta method as a method for numerically solving ordinary differential equations at the predictor stage, instead of the Euler method.

Метод частиц представляет собой численный метод моделирования больших систем на основе их лагранжева описания. Разрывный метод частиц относится к типу "частица-частица" и состоит из двух основных этапов: предиктор и корректор. На этапе предиктора происходит сдвиг частиц. На этапе корректора среди соседей частицы выбирается партнер для взаимодействия, наиболее влияющий на локальную динамику системы. "Разрывность" метода заключается в способе коррекции плотности лишь одной из взаимодействующих частиц, благодаря чему восстановление плотности распределения происходит в минимальной области, определяемой только двумя выбранными частицами, что приводит к размазыванию фронта лишь на одну частицу. Новизна представленного в этой статье варианта метода состоит в том, что на первый план ставится плотность частиц, а не их форма. Критерием перестройки служит сохранение проекции массы на плоскость, проходящей через центры масс взаимодействующих частиц.

Сосед для коррекции плотности выбирается с помощью "прицельного параметра". Построение плотности происходит по двум выбранным взаимодействующим частицам, что позволяет свести двумерную задачу к одномерной. Эффективность метода представлена на примере теста Кроули. Показано, что метод Рунге-Кутты на этапе предиктора существенно повышает точность численного решения. Наш лагранжев подход к построению метода частиц контрастирует с часто используемым другим представителем метода типа "частица-частица" - методом сглаженных частиц (SPH).

### *Список литературы*

1. Bogomolov S.V., Filippova M.A., Kuvshinniov A.E. A discontinuous particle method for the inviscid Burgers' equation // J.Phys. Conf. Series. 2021.Vol. 1715. P. 012066

А.И. САВВАТИМСКИЙ, В.Н. КОРОБЕНКО

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## ОТ ЖИДКОГО УГЛЕРОДА - К ЖИДКОМУ АЛМАЗУ

Рассмотрены эксперименты быстрого импульсного нагрева анизотропного графита в сапфировых капиллярных трубках с измерением электросопротивления  $R$  жидкого углерода различной плотности при высоких температурах (~ 20000 К) и давлений 50-100 кбар (оценка). Впервые обнаружен новый физический эффект: более высокая плотность жидкого углерода приводит к более высокому сопротивлению  $R$  при одной и той же введенной энергии.

A.I. SAVVATIMSKIY, V.N. KOROBENKO

*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

## FROM LIQUID CARBON – TO LIQUID DIAMAND

Experiments of rapid pulsed heating of anisotropic graphite in sapphire capillary tubes with measurement of electrical resistance  $R$  of liquid carbon of various densities at high temperatures (~ 20,000 K) and pressures of 50-100 kbar (estimation) are considered. A new physical effect has been discovered for the first time: a higher density of liquid carbon leads to a higher resistance  $R$  at the same energy input.

С применением быстрого «взрывного» метода нагрева проводников импульсом электрического тока в ОИВТ РАН исследовался жидкий углерод. Были измерены: электросопротивление  $R$  и теплоемкость  $C_p$  и  $C_V$  (вплоть до 7500 К) [1]. Благодаря короткому времени нагрева - жидкий образец не теряет исходную форму, что позволяет измерить  $R$  и другие свойства (плотность, теплоемкость  $C_p$  и введенную удельную энергию  $H$ ). Тепловые потери всех видов составляют ~ 1-2 % от вложенной энергии. Для исследования жидкого углерода при высоких давлениях, в [2] использовались сапфировые толстостенные трубки (внутренний диаметр 1 мм, внешний 10-12 мм). Сапфир ( $Al_2O_3$ ) обладает высокой прочностью и тугоплавкостью. Плавление сапфира происходило в тонком слое контакта с нагретым углеродом. Это не влияет на измерение свойств жидкого углерода, однако препятствует измерению температуры через расплавленный слой сапфира, который поглощает излучение. Температура рассчитывалась из измеренной удельной введенной энергии  $H$  и измеренной (в отдельном эксперименте) теплоемкости  $C_V = 3$  Дж/г·К.

Образцы графита изготавливались из анизотропного графита высокой плотности. Поскольку торцы трубок плотно сжимались с торцов, жидкий углерод нагревался в ограниченном объеме с повышением внутреннего давления в трубке. Это давление, вплоть до разрушения сапфира, достигало 50-100 кбар (оценка). Давление сравнивалось также с экспериментом М.Тогайя [3], который получил ранее зависимость  $R$  жидкого углерода от стационарного давления вплоть до 100 кбар. Примечательно, что разрушение сапфировой трубки происходило только вдоль трубки (на 2-3 продольных части); видимый диаметр внутреннего отверстия (после опыта) - мало изменился относительно исходного.

Получены измерения для трех величин плотности жидкого углерода (от 1 до 2 г/см<sup>3</sup>), при которых достигаются давления порядка 50-100 кбар. Эксперимент показал, что с ростом давления наблюдается рост  $R$  жидкого углерода с ростом давления, (что совпадает с данными М.Тогайя [3]). Однако нами впервые установлено, что жидкий углерод более высокой плотности имеет большее сопротивление. Примечательно, что крутой рост  $R$  жидкого углерода происходит необратимо, вплоть до момента разрушения сапфировой трубки. Более высокая плотность жидкого углерода приводит к потере проводимости при меньшей температуре. Оценка давления для этого момента потери проводимости дает ~ 60 кбар, что близко к оценке стационарного перехода графит - алмаз, которую опубликовал О.И.Лейпунский [4].

Продемонстрирован экспериментальный подход для измерения физических свойств жидкого углерода при простом способе создания высоких температур и высоких давлений. Эксперимент показывает, что 'большая плотность жидкого углерода приводит к потере проводимости при меньшей температуре. Либо это способ для создания алмазов простыми средствами, либо наблюдается общее свойство всех проводников при создании подобных структур при высоком давлении. Напомним, что рост  $R$  лития при давлениях выше 600 кбар наблюдался ранее [5]. Обсуждение приведено в [6]. Однако то, что 'большая плотность жидкого углерода приводит к более высокому  $R$  (при меньших введенных энергиях), - получено впервые в [2].

### Список литературы

1. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. // УФН, 2020, Т.190, №10, С. 1085-1108.
2. Savvatimskiy A.I. // Carbon, 2009, V.47, P. 2322-2328; Korobenko V.N., and Savvatimskiy A.I. // in the book Thermal conductivity 30, Thermal expansion 18; DEStech Publications, Inc. Pittsburg, USA, 2009, P.787-793.
3. Togaya M. Behaviors of liquid carbon at high pressure // V.V. Brazhkin et al. (eds.), New Kinds of Phase Transitions: Transformations in Disordered Substances, 2002, P. 255-266. Kluwer Academic Publishers.
4. Лейпунский О.И. Об искусственных алмазах, // Успехи химии, 1939, Т. 8, № 10, С. 1519.
5. Neaton J.B., Ashcroft N.W. // Letters to Nature, 1999, 400, 141.
6. Максимов Е.Г., Магницкая М.В., Фортов В.Е. // УФН, 2005, Т.175, №8, С.793–813.

## ИМПУЛЬСНЫЙ «ВЗРЫВНОЙ МЕТОД» ИССЛЕДОВАНИЯ ТУГОПЛАВКИХ КАРБИДОВ (ВКЛЮЧАЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЙ) ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДО 5500 К

Представлен обзор экспериментов при быстром импульсном нагреве (микросекунды) током тугоплавких карбидов с измерением свойств при плавлении и в жидком состоянии (электрического сопротивления  $R$ , энтальпии  $H$ , теплоемкости  $C_p$ ). Температура измерялась пирометром, вплоть до  $\sim 6000$  К. При отсутствии данных об излучательной способности карбидов, использовалась модель черного тела, состоящая из двух плоских фольг (угловая модель). Температура плавления всех исследованных карбидов не превышала 4300 К. Теплоемкость, круто растущая перед плавлением, после плавления (также быстро) спадала к равновесным значениям. Эффект возможно связан с появлением парных дефектов Френкеля перед плавлением. Данные полученные авторами для плавления и жидкой фазы карбидов, являются, как правило, - единственными в мировой литературе.

A.I. SAVVATIMSKIY, S.V.ONUFRIEV, N.M.ARISTOVA  
Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia

## PULSED "EXPLOSIVE METHOD" FOR THE STUDY OF REFRACTORY CARBIDES (INCLUDING HIGH-ENTROPY) AT HIGH TEMPERATURES, UP TO 5500 K

An overview of experiments with rapid pulsed heating (microseconds) by a current of refractory carbides with a measurements of the properties during melting and in the liquid state (electrical resistance  $R$ , enthalpy  $H$ , specific heat  $C_p$ ) is presented. The temperature was measured by a pyrometer, up to  $\sim 6000$  K. In the absence of the data for the emissivity of carbides, a blackbody model consisting of two flat foils (corner model) was used. The melting point of all carbides studied, did not exceed 4,300 K. The specific heat, which grew steeply before melting, after melting (also rapidly), - decreased to equilibrium values. The effect may be related to the appearance of paired Frenkel defects just before melting. The data obtained by the authors for the melting and liquid phase of carbides are, as a rule, the only ones in the world literature.

Представлены результаты экспериментов при исследовании теплофизических свойств тугоплавких карбидов при импульсном электрическом нагреве в течение 5-10 мкс ( $dT/dt \sim 5 \cdot 10^8$  К/с). Рассмотрены свойства для  $ZrC$ ;  $ZrC+C$ ;  $HfC$ ;  $TaC$ ;  $TaC+HfC$ ; в зависимости от температуры, измеренной от  $\sim 2000$  К до 5500 К [1]. В том числе рассмотрены свойства высоко-энтропийного карбида ( $HfTaTiNbZrC$ ) [2]. Приведены данные по энтальпии, удельной теплоемкости  $C_p$ , теплоте плавления и электрическому сопротивлению. Для всех исследованных карбидов наблюдается резкое увеличение удельной теплоемкости твердой фазы за  $\approx 300$  К до плавления, с дальнейшим падением в жидкой фазе. Это может быть связано с образованием неравновесных парных дефектов Френкеля в условиях недостатка времени для насыщения решетки равновесными вакансиями. Предельная температура плавления всех карбидов – не превышает 4300 К. На Рис. 1 представлена теплоемкость высоко-энтропийного карбида ( $HfTaTiNbZrC$ ) вплоть до 5500 К. На Рис. 2 – Энтальпия того же карбида – до 5500 К

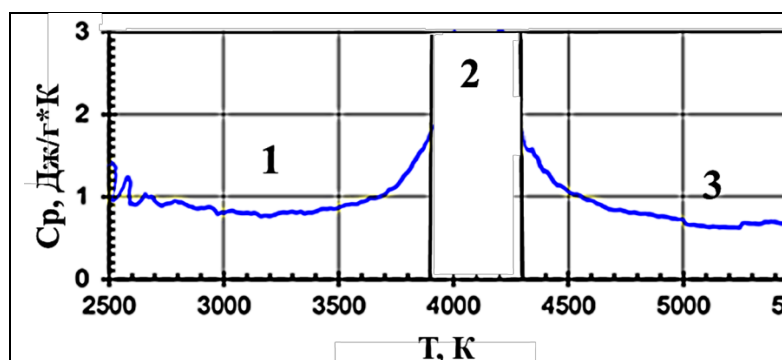


Рис. 1. Теплоемкость высоко-энтропийного карбида ( $HfTaTiNbZrC$ ) [2]; 1 – твердая фаза; 2 – Плавление (3900-4300 К); 3 – Жидкая фаза ( $C_p$  – ниже твердой фазы, так как отсутствуют исходные дефекты, а примеси растворены).

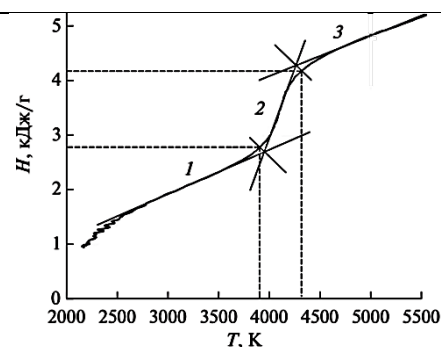


Рис. 2. Энтальпия  $H$  этого же карбида [2]. 1 – твердая фаза; 2 – плавление (3900 – 4300 К,  $\Delta H = 1.4$  кДж/г); 3 – жидкая фаза.

### Список литературы

1. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Аристов Н.М. // УФН, 2020, Успехи физических наук, 2022, Т.192, № 6, С. 642-662.
2. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Седегов А.С. и другие. Теплофизические свойства высокоэнтропийного карбида ( $HfTaTiNbZrC$ ) при температурах от 2500 до 5500 К, // ТВТ, 2022, том 60, выпуск 5, 672–675.

П.А. ВЛАСОВ<sup>1,2</sup>, А.Р. АХУНЬЯНОВ<sup>1</sup>, В.Н. СМИРНОВ<sup>1</sup>, А.В. АРУТЮНОВ<sup>1</sup>, В.С. АРУТЮНОВ<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук

## ПОЛУЧЕНИЕ СИНТЕЗ-ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОБАВОК H<sub>2</sub>O, CO, И CO<sub>2</sub> В КАЧЕСТВЕ ОКИСЛИТЕЛЯ В БЕСКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЯХ МЕТАНА, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ИЗ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ

Проведено детальное кинетическое моделирование процесса получения синтез-газа при паровой конверсии различных бескислородных смесей метана с добавками H<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>, сильно разбавленных аргоном, с учетом образования микрогетерогенных частиц сажи в газовой фазе в условиях непостоянной температуры.

P.A. VLASOV<sup>1,2</sup>, A.R. AKHUNYANOV<sup>1</sup>, V.N. SMIRNOV<sup>1</sup>, A.V. ARUTYUNOV<sup>1</sup>, V.S. ARUTYUNOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow Region

## SYNTHESIS GAS PRODUCTION USING H<sub>2</sub>O, CO, AND CO<sub>2</sub> ADDITIVES AS AN OXIDIZER IN OXYGEN-FREE METHANE MIXTURES FORMED FROM BIOMASS GASIFICATION PRODUCTS

A detailed kinetic modeling of the process of synthesis gas production during steam reforming of various oxygen-free mixtures of methane highly diluted with argon with H<sub>2</sub>, CO and CO<sub>2</sub> additives, was carried out, taking into account the formation of microheterogeneous soot particles in the gas phase under conditions of variable temperature.

В настоящее время происходят климатические изменения, связанные с ростом концентрации в атмосфере парниковых газов, в частности CO<sub>2</sub>. Росту концентрации одного из наиболее известных парниковых газов CO<sub>2</sub> способствуют процессы сжигания ископаемых топлив, которые на текущий момент являются основными источниками получения энергии. Наиболее часто используемыми видами ископаемых топлив являются уголь и природный газ. Их использование приводит в процессе горения к большим выбросам парниковых газов и других вредных загрязняющих атмосферу веществ. В последнее время возрос интерес к процессам газификации угля и конверсии метана для получения синтез-газа, который рассматривается как менее экологически вредный вид топлива. В ряде стран внимание привлекает также использование биомассы в качестве горючего или в более технологически продвинутых процессах получения жидкого топлива или водорода, использующегося в топливных элементах [1]. Для этого также требуется получение высококачественного синтез-газа (смеси CO и H<sub>2</sub>). Биомасса — крупнейший в мировом хозяйстве возобновляемый ресурс. Основным продуктом газификации биомассы является метан, который в дальнейшем конвертируется в синтез-газ, но также образуются и другие углеводороды, включая и кислородсодержащие соединения, а при определенных условиях — кокс и частицы сажи, которые нежелательны для достижения высокого коэффициента полезного действия процесса конверсии метана и предотвращения загрязнения окружающей среды. Продукты газификации биомассы могут образовать три различные фазы. Твердая фаза включает сажу, образующуюся в газовой фазе, и твердый углеродный осадок (кокс) на поверхности реактора. Жидкая фаза включает конденсируемые промежуточные продукты, называемые смолами, а оксиды углерода (CO и CO<sub>2</sub>), водород, вода, метан и другие легкие углеводороды остаются в газовой фазе.

Целью работы было проведение детальное кинетическое моделирование процесса получения синтез-газа при высокотемпературной паровой конверсии различных бескислородных смесей метана с добавками H<sub>2</sub>, CO и CO<sub>2</sub>, сильно разбавленных аргоном, аналогичные смеси в экспериментах [2], с учетом образования микрогетерогенных частиц сажи в газовой фазе в условиях непостоянной температуры. Это позволило провести прямое сравнение результатов расчетов с результатами экспериментов. Сильное разбавление позволило в эксперименте определить целый ряд промежуточных продуктов реакции и провести сравнение их концентраций с результатами кинетических расчетов. Использование сильно разбавленных аргоном смесей также обеспечило более равномерный прогрев проточного реактора в экспериментах, проведенных в работе [2]. В экспериментах количественно определялись концентрации исходных, промежуточных и конечных продуктов риформинга метана в смесях с добавками H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO и CO<sub>2</sub>. В работе были проведены детальные расчеты процесса сажеобразования для всех исследованных смесей и условий экспериментов. В [2] не рассматривался процесс сажеобразования, но анализировался другой процесс — гетерогенное образование твердого углерода на поверхности реактора. Сопоставление результатов наших кинетических расчетов с результатами экспериментов и расчетов [2] позволит оценить влияние процесса сажеобразования на процесс риформинга метана в бескислородных смесях метана с добавками H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO и CO<sub>2</sub>, а также оценить роль ацетилена в образовании твердого углерода на поверхности реактора и частиц сажи, образующихся в газовой фазе, на конечное распределение продуктов реакции риформинга метана в рассматриваемых условиях.

*Список литературы*

1. Demirbas A. // Prog. Energ. Combust. 2005. Vol. 31. P. 171–192.
2. Hiblot H., Ziegler-Devine I., Fournet R., Glaude P. A. // Int. J. Hydrogen Energ., 2016. Vol. 41. P. 18329–18338.



Г.Л. АГАФОНОВ<sup>1</sup>, Э.К. АНДЕРЖАНОВ<sup>1</sup>, А.С. БЕТЕВ<sup>1</sup>, С.П. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, А.М. ТЕРЕЗА<sup>1</sup>,  
С.В. ХОМИК<sup>1</sup>, Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ НА ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В ЛАМИНАРНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ ПЛАМЕНАХ

Проведены численное моделирование структуры и расчеты скорости распространения пламени в водородно-воздушных смесях с содержанием водорода от 12% до 80% при стандартных начальных условиях. Анализ показывает, что существует поперечное сечение зоны пламени, в котором локальная чувствительность температуры ко всем элементарным реакциям, определяющим тепловыделение, меняет знак. Вблизи концентрационных пределов инверсия влияния кинетики ведущих реакций на тепловыделение характеризуется подобием между профилями чувствительности температуры по разные стороны этого сечения. Дано качественное объяснение наблюдаемых эффектов.

G.L. AGAFONOV<sup>1</sup>, E.K. ANDERZHANOV<sup>1</sup>, A.S. BETEV<sup>1</sup>, S.P. MEDVEDEV<sup>1</sup>, A.M. TEREZA<sup>1</sup>,  
S.V. KHOMIK<sup>1</sup>, T.T. CHEREPANOVA<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## INFLUENCE OF CHAIN REACTION KINETICS ON HEAT RELEASE IN LAMINAR HYDROGEN-AIR FLAMES

Numerical simulations of laminar flame structure and velocity have been performed for hydrogen-air mixtures with hydrogen content varied from 12 to 80% under standard conditions. An analysis has shown that there exists a cross section of the flame zone where the local temperature sensitivities to all reaction steps that control heat release change their signs. Near flammability limits, the inversion of the influence of leading reactions on heat release is characterized by similarity between temperature-sensitivity profiles on opposite sides of this cross section. A qualitative explanation of the observed effects is given.

Исследования воспламенения и горения водородно-воздушных смесей актуальны для водородной энергетики и обеспечения пожаровзрывобезопасности при хранении и транспортировке водорода. С точки зрения безопасности АЭС наиболее важны характеристики пламен, близких к нижнему (бедному) концентрационному пределу распространения пламени (КПП). В представленной работе с помощью программного модуля CHEMKIN-Pro [1] проведено численное моделирование ламинарных водородно-воздушных пламен с использованием детального кинетического механизма (ДКМ) [2] при стандартных начальных условиях. Содержание водорода в смеси с воздухом варьировалось от 12% до 80%.

Представлены результаты расчетов температурного профиля и нормальной скорости распространения для бедных, богатых и стехиометрического (29.6%Н<sub>2</sub>) пламен. Анализ показывает, что существует поперечное сечение зоны пламени, в котором локальная чувствительность температуры ко всем элементарным реакциям, определяющим тепловыделение, меняет знак. Соответствующая температура инверсии  $T_i$  меняется в зависимости от состава смеси подобно температуре термодинамически равновесных продуктов сгорания  $T_{eq}$ , с максимумом вблизи стехиометрии. Температура в сечении с максимальным градиентом  $(dT/dx)_{max}$  имеет обратную зависимость от состава, с минимумом при 40%Н<sub>2</sub>, что соответствует максимуму нормальной скорости распространения пламени. В пламенах с содержанием водорода в диапазоне от 20% до 70%, помимо инверсии при единой для всех реакций температуре  $T_i$ , для некоторых реакций дополнительно наблюдается инверсия в других поперечных сечениях. Внутри этого диапазона существует интервал, в котором значения  $T_i$  превышают температуру *crossover*  $T_c$  [3], определяемую равенством скоростей реакций разветвления ( $H + O_2 = OH + O$ ) и обрыва ( $H + O_2 + M = HO_2 + M$ ) цепи. Для используемого в работе ДКМ  $T_c \sim 990$  К. Наборы ведущих реакций, определяющих тепловыделение в окрестности поперечного сечения, где наблюдается инверсия, различны вблизи бедных и богатых пределов. В то же время с приближением к пределам становится более отчетливым подобие между профилями чувствительности температуры по разные стороны этого сечения.

### Список литературы

1. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
2. Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 6. С. 35.
3. Sanchez A.L., Williams F.A. // Progress Energy Combust. Sci. 2014. V. 41. P. 1.

Т.Т. ЧЕРЕПАНОВА<sup>1</sup>, Г.Л. АГАФОНОВ<sup>1</sup>, Э.К. АНДЕРЖАНОВ<sup>1</sup>, А.С. БЕТЕВ<sup>1</sup>,  
С.П. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, А.М. ТЕРЕЗА<sup>1</sup>, С.В. ХОМИК<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕАКЦИЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ЗАДЕРЖКУ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ВЫБОРА КИНЕТИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМА НА РОСТ ДАВЛЕНИЯ ПРИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИИ БЕДНЫХ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

Посредством численного моделирования проведено изучение влияния эффективности по соударению с третьим телом (СЕ) и выбора кинетического механизма на самовоспламенение бедных водородно-воздушных смесей и динамику роста давления в течение этого процесса. Исследовались смеси, содержащие 6% водорода в воздухе при давлениях 1 и 6 атм. Диапазон температуры составил 850 – 1700 К. Установлено, что для бедных смесей рост давления не зависит от выбора кинетического механизма. Показано, что рост давления не зависит от задержки воспламенения, и выход на термодинамическое равновесие определяется в основном реакциями рекомбинации. Чувствительность задержки воспламенения к СЕ наиболее высока для реакции  $H+O_2+M$ . Рост давления уменьшает эту чувствительность. Влияние СЕ значительно меньше для реакции  $OH+OH+M$ .

T.T. CHEREPANOVA<sup>1</sup>, G.L. AGAFONOV<sup>1</sup>, E.K. ANDERZHANOV<sup>1</sup>, A.S. BETEV<sup>1</sup>, S.P. MEDVEDEV<sup>1</sup>, A.M. TEREZA<sup>1</sup>, S.V. KHOMIK<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF THE EFFECTS OF RECOMBINATION REACTIONS ON IGNITION DELAY AND OF THE CHOICE OF KINETIC MECHANISM ON PRESSURE GROWTH DURING AUTOIGNITION OF LEAN HYDROGEN-AIR MIXTURES

Numerical simulations of autoignition of lean hydrogen–air mixtures have been performed to examine the influence of third-body collision efficiency (chaperon efficiency, CE) and of the choice of kinetic mechanism on pressure growth dynamics during the process. Mixtures containing 6% hydrogen in air at pressures of 1 and 6 bar were studied. The temperature range explored was 850 – 1700 K. It has been found that pressure growth dynamics is independent of the chosen kinetic mechanism and ignition delay. The approach to thermodynamic equilibrium is mainly determined by recombination reactions. Sensitivity of ignition delay to CE is the highest for the  $H + O_2 + M$  reaction, decreasing with pressure increase. The influence of CE is significantly weaker for the  $OH + OH + M$  reaction.

Развитие технологий, направленных на повышение пожаровзрывобезопасности АЭС имеет актуальное значение. Рациональный подход требует предварительного численного моделирования различных критических ситуаций, способных приводить к разрушению конструкций АЭС. Одной из задач на этом пути является изучение самовоспламенения бедных водородно-воздушных смесей с последующим повышением давления в замкнутых пространствах. В проведенном исследовании посредством численного моделирования изучалось влияние реакций рекомбинации на самовоспламенение бедной водородно-воздушной смеси (6%  $H_2$ ) и последующий рост давления. Расчеты проводились при постоянном объеме с использованием программного пакета CHEMKIN-Pro [1].

Расчеты динамики роста давления проводились на основе трех детальных кинетических механизмов (ДКМ) [2–4] в диапазоне  $850 < T_0 < 1700$  К для начальных давлений 1 и 6 атм, исходя из рекомендаций [5]. Установлено, что рост давления определяется кинетикой реакций после достижения времени задержки воспламенения  $\tau$ , причем определяющую роль играют реакции рекомбинации. Динамика роста давления одинакова при выборе любой из трех ДКМ. С повышением  $T_0$  абсолютная величина избыточного давления  $\Delta P$  и скорость его нарастания значительно уменьшаются. Расчеты показали, что в масштабе времени  $\tau$  термодинамическое равновесие (ТР) достигается быстро при  $T_0 < 1200$  К для  $P_0 = 1$  атм и  $T_0 < 1400$  К для  $P_0 = 6$  атм. С повышением  $P_0$  выход на ТР происходит быстрее, а с увеличением  $T_0$  – медленнее. Влияние эффективности соударений с третьим телом (chaperon efficiency, CE) на задержку воспламенения изучалось в диапазонах  $850 < T_0 < 1000$  К при  $P_0 = 1$  атм и  $1000 < T_0 < 1200$  К при  $P_0 = 6$  атм с использованием ДКМ из работы [3] для всех возможных 6 реакций рекомбинации с разными наборами СЕ, представленными в литературе. Установлено, что величина  $\tau$  чувствительна к изменению СЕ только для двух реакций —  $H + O_2 + M$  и  $OH + OH + M$  — и уменьшается с ростом  $P_0$ . При этом чувствительность к набору СЕ для первой реакции значительно выше.

### Список литературы

1. CHEMKIN-Pro 15112, Reaction Design: San Diego, CK-TUT-10112-1112-UG-1, 2011.
2. Keromnes A., Metcalfe W.K., Heufer K.A., et al. // Combust. Flame. 2013. V. 160. P. 995.
3. Власов П.А., Смирнов В.Н., Тереза А.М. // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 6. С. 35.
4. Konnov A.A. // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 3755
5. Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., Jordan T. // J. Loss Prevention Process Industries. 2013. V. 26. P. 317.

В.А. СМЕТАНИЮК<sup>1</sup>, С.М ФРОЛОВ<sup>1,2</sup>, К.С. ПАНИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ГАЗИФИКАЦИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Проведено термодинамическое моделирование процесса газификации жидких углеводородных отходов (ЖУО) в потоке высокотемпературного газифицирующего агента (ВГА). Источник ВГА – импульсно-детонационная пушка (ИДП). Основные компоненты ВГА – ультраперегретая смесь водяного пара и диоксида углерода с температурой продуктов детонации в состоянии Чепмена – Жуге или продуктов детонации, расширенных до атмосферного давления. Термодинамическое моделирование показало, что при конверсии ЖУО возможно получение синтез-газа с нижней теплотой сгорания 12-20 МДж/кг.

V.A. SMETANYUK<sup>1</sup>, S.M. FROLOV<sup>1,2</sup>, K.S. PANIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences., Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## GASIFICATION OF ORGANIC WASTE BY HIGH-TEMPERATURE PRODUCTS OF GASEOUS DETONATION: THERMODYNAMIC MODELING

Thermodynamic modeling of the gasification process of liquid hydrocarbon waste in the flow of the ultra-superheated gasifying agent (GA) composed of the mixture of steam and carbon dioxide is carried out. The source of the GA is a pulsed detonation gun (PDG) operating on methane–oxygen or methane–air mixture, so that the GA is represented by the high-temperature detonation products in the Chapman–Jouguet state or the detonation products expanded to atmospheric pressure. Thermodynamic modeling shows that waste gasification allows the production of syngas with a lower heating value of 12–20 MJ/kg.

Для переработки жидких и твёрдых органических отходов (ЖБО/ТБО) разработаны и внедрены в промышленность различные термические методы. Общим для данных технологий является нагрев органических отходов с их последующим разложением и конверсией. Наибольшее распространение при крупнотоннажной переработке отходов получил метод нагрева при прямом сжигании сырья с воздухом. Этот метод обладает рядом недостатков, связанных с прямым взаимодействием кислорода воздуха с отходами. Использование для нагрева органических отходов водяного пара и/или диоксида углерода имеет ряд преимуществ над остальными термическими методами. В отсутствие свободного кислорода синтез-газ, получаемый паровой/углекислотной газификацией, не содержит сложных и токсичных соединений, таких как диоксины и фураны, что облегчает операцию его очистки. Использование смеси H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> позволяет управлять составом получаемого синтез-газа, который к тому же не содержит азота. Особый интерес представляет предложенная в [1] новая технология газификации органических отходов высокотемпературным газифицирующим агентом (ВГА) на основе смеси водяного пара и диоксида углерода с температурой выше 1500–2000 °С. Способность такого ВГА газифицировать ЖБО/ТБО, не оказывая негативного воздействия на окружающую среду, хорошо известна [2].

Суть разрабатываемой нами технологии газификации органических отходов с помощью ВГА состоит в том, что измельчённые органические отходы, непрерывно подаваемые в зону газификации, подвергаются импульсно-периодическому воздействию ВГА, генерируемого в импульсно-детонационной пушке (ИДП), а продукты газификации непрерывно истекают из проточного реактора-газификатора и направляются потребителю либо полностью, либо частично, если часть продуктов газификации используется для самозапитки ИДП. Технология реализована в экспериментальных установках и проверена на целом ряде органических отходов [3].

Для полного моделирования процесса газификации ЖБО/ТБО требуется проведение трёхмерных газодинамических расчётов с кинетическими механизмами пиролиза и окисления сырья. Пример трёхмерных расчётов приведён в [4]. В данной работе проводится термодинамическое моделирование процесса газификации ЖУО. Термодинамическое моделирование позволяет оценить предельные параметры газификации и выбрать диапазоны оптимальных условий, в частности условий для самозапитки ИДП.

### Список литературы

1. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А. Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ No 2686138 от 24.04.2019. Приоритет от 26.02.2018.
2. Frolov, S.M. Organic waste gasification: A selective review. *Fuels* 2021, 2, 556–651. <https://doi.org/10.3390/fuels2040033>.
3. Frolov S.M., Silantiev A.S., Sadykov I.A., Smetanyuk V.A., Frolov F.S., Hasiak J.K., Vorob'ev A.B., Inozemtsev A.V., Inozemtsev J.O. Gasification of waste machine oil by the ultra-superheated mixture of steam and carbon dioxide. *Waste*, 2023, 1, 515–531. <https://doi.org/10.3390/waste1020031>
4. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Сергеев С. С. Реактор для газификации отходов сильно перегретым водяным паром. Доклады российской академии наук. Химия, науки о материалах, 2020, том 495, с. 71–76. DOI: 10.31857/S2686953520060151.

С.М. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, И. А. САДЫКОВ<sup>1</sup>, В. А. СМЕТАНИУК<sup>1</sup>, А. С. СИЛАНТЬЕВ<sup>1</sup>, Ф. С. ФРОЛОВ<sup>1</sup>,  
Я. К. ХАСЯК<sup>2</sup>, Т.В. ДУДАРЕВА<sup>1</sup>, В.Г. БЕКЕШЕВ<sup>1</sup>, М.В. ГРИШИН<sup>1</sup>, Е.К. ГОЛУБЕВ<sup>1,3</sup>,  
Д. БАЙМУХАМБЕТОВА<sup>1</sup>, В.Я. ПОПКОВА<sup>1</sup>, А.И. ВЕЗЕНЦЕВ<sup>4</sup>, А.Е. РАЗДОБАРИН<sup>4</sup>,  
М.Н. ЯПРЫНЦЕВ<sup>4</sup>, П.В. СОКОЛОВСКИЙ<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук

<sup>2</sup>Институт элементоорганических соединений им. А.Н.Несмеянова Российской академии наук

<sup>3</sup>Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова Российской академии наук

<sup>4</sup>Отдел общей химии Национального исследовательского университета "Белгородский государственный университет"

<sup>5</sup>Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук

## ТЕРМОМЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЛУЗГИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА ИМПУЛЬСНЫМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ СОРБЕНТОВ

Проведены экспериментальные исследования по получению мелкодисперсного углеродистого порошка из лузги семян подсолнечника новым методом термомеханохимической обработки, а именно ударными волнами и струями ультраперегретой смеси (выше 2000 °С) водяного пара и диоксида углерода. Получены результаты химического, фазового и гранулометрического анализа состава порошков, а также их структурные, морфологические и текстурные характеристики. Ожидается что после сушки и деагломерации такой углеродистый порошок может быть использован в качестве адсорбента для органических веществ.

S.M. FROLOV<sup>1</sup>, I.A. SADYKOV<sup>1</sup>, V.A. SMETANYUK<sup>1</sup>, A.S. SILANTIEV<sup>1</sup>, F.S. FROLOV<sup>1</sup>,  
Y.K. HASIAK<sup>2</sup>, T.V. DUDAREVA<sup>1</sup>, V.G. BEKESHEV<sup>1</sup>, M.V. GRISHIN<sup>1</sup>, E.K. GOLUBEV<sup>1,3</sup>, D.  
BAIMUKHAMBETOVA<sup>1</sup>, V.YA. POPKOVA<sup>1</sup>, A.I. VEZENTSEV<sup>4</sup>, A.E. RAZDOBARIN<sup>4</sup>, M.N.  
YAPRYNTSEV<sup>4</sup>, P.V. SOKOLOVSKIY<sup>3,5</sup>

<sup>1</sup> Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup> A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement compounds Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup> Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials, Russian Academy of Sciences

<sup>4</sup> Department of General Chemistry, National Research University "Belgorod State University"

<sup>5</sup> N. D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, Russian Academy of Sciences

## THERMOMECHANOCHEMICAL PROCESSING OF SUNFLOWER SEED HUSKS BY PULSED DETONATION WAVES FOR THE PRODUCTION OF FINE SORBENTS

Experimental studies are conducted to obtain finely dispersed carbonaceous powder from sunflower seed husks using a new thermomechanochemical treatment method involving periodical shock waves and jets of ultra-superheated (above 2000 °C) mixture of steam and carbon dioxide. The results of the chemical, phase and granulometric analyses of the produced powders and their structural, morphological and textural characteristics are also reported. It is expected that such carbonaceous powders can be used as an adsorbent for organic substances after drying and deagglomeration.

Утилизация органических отходов – сложная научно-техническая и социально-экономическая проблема мирового масштаба. Один из многочисленных примеров таких отходов – это отходы производства растительного масла в виде шелухи семян подсолнечника, исчисляемые в России сотнями тысяч тонн в год. Нами предложена и в течение нескольких лет применяется новая технология газификации органических отходов ультраперегретой смесью водяного пара и диоксида углерода с температурой выше 2000 °С, полученной с помощью импульсной детонации топливно-кислородных смесей. В отличие от предыдущих наших работ, в настоящей работе эта технология применяется для получения мелкодисперсного углеродистого порошка из шелухи семян подсолнечника, который может быть использован в качестве сорбционно-активного материала. В работе изучены режимы газификации, в которых возникает углеродистый порошок, и проведена оценка возможности его использования в качестве адсорбента на основе его состава, а также структурных, морфологических и текстурных свойств. Исходное сырье имело волокнистую микроструктуру с неровным рельефом и в основном содержало углерод (46 масс. %) и кислород (53 масс. %) с незначительными концентрациями калия, кальция и магния. Газифицирующий агент был получен путем импульсной детонации (1 Гц) околостехиометрической смеси природного газа с кислородом и состоял из водяного пара (62 об. %), диоксида углерода (35 об. %) и следовых концентраций H<sub>2</sub> и CO. Эксперименты показали, что при постепенном уменьшении наполнения и частоты работы импульсно-детонационной пушки средняя температура среды в газификаторе постепенно снижалась, что приводило к появлению в продуктах газификации твердого остатка в виде мельчайших углеродистых частиц. По сравнению с исходным сырьем получаемый порошок содержал больше углерода (от 51 до 56 масс. %) и меньше кислорода (от 33 до 42 масс. %), а также больше калия (до 5 масс. %), кальция (до 2,6 масс. %) и магния (до 1 масс. %). Кроме того, получаемый порошок в основном состоял из агломератов частиц средним размером 12-24 мкм, образовавшихся при конденсации водяного пара по завершении эксперимента. Однако детальные исследования методом зондовой микроскопии показали, что агломераты состояли из частиц значительно меньшего среднего размера: 20-30 нм. Несмотря на то, что удельная поверхность агломерированных углеродистых частиц оказалась относительно низкой (1,1-1,7 м<sup>2</sup>/г), ожидается, что после сушки и деагломерации полученный нанопорошок может использоваться в качестве сорбционно-активного материала по отношению к органическим веществам.

А.С. СИЛАНТЬЕВ, И. А. САДЫКОВ, В. А. СМЕТАНЮК, С. М. ФРОЛОВ,  
Ф.С. ФРОЛОВ, Я.К. ХАСЯК

Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

## ОБРАБОТКА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ИМПУЛЬСНО-ДЕТОНАЦИОННЫМИ ВОЛНАМИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ФРАКЦИЙ

Представлены результаты испытаний инновационной лабораторной установки, предназначенной для экологически чистого удаления органических фракций с печатных плат импульсно-детонационными волнами.

A.S. SILANTIEV, I. A. SADYKOV, V.A. SMETANYUK, F. S. FROLOV, S. M. FROLOV, Y.K. HASYAK

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## TREATMENT OF PRINTED BOARDS WITH PULSE DETONATION WAVES TO REMOVE ORGANIC FRACTIONS

Presented are the results of testing an innovative laboratory installation for the environmentally friendly removal of organic fractions from printed circuit boards by pulsed detonation waves.

Основные компоненты электронных отходов, такие как отходы печатных плат (ОПП), могут содержать токсичные вещества, включая полихлорированные бифенилы, полибромированные бифенилы, поливинилхлорид, бромированные антипирены, полибромированные дифениловые эфиры, тетрабромбисфенол-А и другие. С одной стороны, при переработке таких отходов выплавлением или сжиганием могут образовываться диоксины и фураны. Кроме того, различные компоненты печатных плат, такие как разъемы, провода, конденсаторы и аккумуляторы, могут содержать опасные вещества, например кадмий, мышьяк, свинец и т.д. С другой стороны, в таких отходах содержатся благородные и редкие металлы, которые могут быть повторно использованы. Для переработки ОПП существуют различные методы, включая простое захоронение, механическую и термическую переработку, а также комбинированные подходы, такие как гидрометаллургическая и пирометаллургическая обработка. Однако наиболее безопасным и эффективным методом утилизации ОПП может оказаться газификация с использованием высокотемпературной смеси водяного пара и  $\text{CO}_2$ .

Нами предложена новая технология газификации ОПП высокотемпературными продуктами импульсной детонации топливно-кислородных или топливно-воздушных смесей. В ходе экспериментов с метано-кислородными смесями была достигнута высокая степень газификации органических веществ в ОПП, превышающая 98%. Газообразные продукты газификации в основном состояли из  $\text{CO}_2$  (52,2%),  $\text{CO}$  (25,1%),  $\text{H}_2$  (15,7%),  $\text{N}_2$  (3,4%) и  $\text{CH}_4$  (2,3%), причем доля горючих газов составляла 45%. При частоте детонации 2 Гц газообразные продукты содержали незначительное количество смол в виде конденсируемых углеводородов, таких как бензол и его гомологи. Увеличение частоты детонации выше 2 Гц должно привести к полному исчезновению смол и повышению экологической чистоты продуктов газификации ОПП. Твердые остатки газификации состояли из металлических включений разных размеров и мелкодисперсной золы (Рис.1). Все зольные частицы имели размер менее 300-400 мкм, включая большую фракцию с размерами менее 100 мкм. На рисунке 2 приведен пример распределения зольных частиц по размерам. Примерно 30% всех частиц имели размер менее 10 мкм, тогда как размеры остальных 70% частиц лежали в диапазоне от 10 до 100 мкм. Такая мелкодисперсная зольная фракция образовывалась в результате термомеханического воздействия импульсных ударных волн, подаваемых в реактор из импульсно-детонационной пушки. Твердые остатки переработки ОПП содержали Sn, Pb, Cu, Ni, Fe, In, Cd, Zn, Ca, Si, Al, Ti, Ni и Cl, причем в максимальных количествах обнаруживались Sn (10–20%), Pb (5–10%) и Cu (до 1,5%).

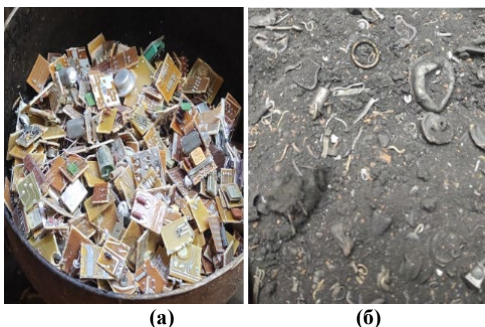


Рис. 1. Фотографии (а) исходных электронных отходов и (б) твердых остатков газификации ОПП

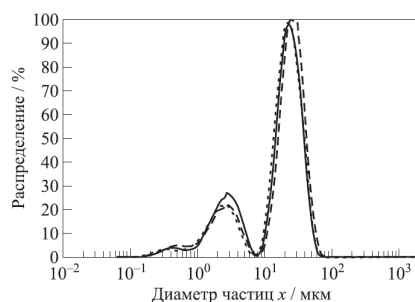


Рис. 2. Распределения зольных частиц по размерам, полученные методом влажной лазерной дифракции

В будущем основное внимание будет уделяться повышению эффективности термомеханической переработки ОПП путем сокращения выноса твердых остатков из проточного реактора вместе с газами и повышению скорости превращения конденсируемых углеводородов в газообразные продукты газификации путем увеличения частоты детонации.

К.А. БЫРДИН<sup>1</sup>, К. А. АВДЕЕВ<sup>1</sup>, И. О. ШАМШИН<sup>1</sup>,  
В. С. АКСЕНОВ<sup>1</sup>, С. М. ФРОЛОВ<sup>1</sup>, П.А. СТОРОЖЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Государственный Орден Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений», Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ ВОДЯНОГО ПАРА И ТРИЭТИЛАЛЮМИНИЯ

Представлены результаты экспериментов, в которых продемонстрирована возможность усиления ударной волны в двухфазной смеси перегретого водяного пара и триэтилалюминия (ТЭА).

К.А. BYRDIN<sup>1</sup>, К. А. AVDEEV<sup>1</sup>, I. O. SHAMSHIN<sup>1</sup>,  
V. S. AKSENOV<sup>1</sup>, S.M. FROLOV<sup>1</sup>, P.A. STOROZHENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>State Research Institute of Chemistry and Technology of Organoelement Compounds, Moscow, Russia

## INVESTIGATION OF SHOCK WAVE AMPLIFICATION IN A TWO-PHASE MIXTURE OF WATER VAPOR AND TRIETHYL ALUMINUM

This paper presents the results of experiments in which the possibility of shock wave amplification in the two-phase mixture of superheated steam and triethylaluminum (TEA) is demonstrated.

Эксперименты проведены на ударной трубе, состоящей из камеры высокого давления (КВД) и обогреваемой камеры низкого давления (КНД), разделенных разрывной диафрагмой. Жидкий ТЭА подавался в КНД, непрерывно прокачиваемую перегретым водяным паром, в виде импульсной струи, направленной вдоль оси КНД. Ударная волна (УВ) генерировалась благодаря сжиганию метанокислородной смеси в КВД и разрыву диафрагмы. При определенных условиях УВ, проходя через облако капель ТЭА, вызывала экзотермическую химическую реакцию ТЭА с ударно сжатым и разогретым водяным паром и заметно усиливалась. Экспериментально определены условия усиления УВ, связанные с синхронизацией моментов подачи ТЭА и прихода УВ в облако ТЭА.

Т.И. ЭЙВАЗОВА<sup>1</sup>, И.О. ШАМШИН<sup>2</sup>, В.С. ИВАНОВ<sup>2</sup>, В.С. АКСЕНОВ<sup>1,2</sup>, П.А. ГУСЕВ<sup>2</sup>,  
С.М. ФРОЛОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ МЕСТА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ НА ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ СЛОЕ ЭТИЛЕНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

Проведена серия экспериментов с целью исследования процессов распространения пламени и перехода горения в детонацию (ПГД) в щелевой камере сгорания с отдельной подачей этилена и кислорода через два ряда форсунок на днище камеры. Рассмотрена зависимость вероятности возникновения ПГД от высоты расположения точечного искрового источника зажигания. Отмечена зависимость давления на детонационном фронте от расхода газа в эксперименте.

T. I. EYVAZOVA<sup>1</sup>, I.O. SHAMSHIN<sup>2</sup>, V.S. IVANOV<sup>2</sup>, V.S. AKSENOV<sup>1,2</sup>, P.A. GUSEV<sup>2</sup>,  
S.M. FROLOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Department of Combustion and Explosion, Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## THE EFFECT OF THE IGNITION SITE ON THE AND DEFLAGRATION TO DETONATION TRANSITION IN A SEMI-LIMITED LAYER OF AN ETHYLENE-OXYGEN MIXTURE

A series of experiments is conducted to study the processes of flame propagation deflagration-to-detonation transition (DDT) in a slit combustor with separate supply of ethylene and oxygen through two rows of nozzles at the combustor bottom. The dependence of the DDT probability on the location (height) of a point ignition source is considered. The dependence of the pressure at the detonation front on the gas flow rate in the experiment is noticed.

Один из способов инициирования детонации – это организация перехода горения в детонацию. Определение критических условий инициирования детонации необходимо для безопасного запуска непрерывно-детонационных двигателей [1]. В работах [1-3] экспериментально и с помощью численного моделирования получены критические значения высоты слоя горючей смеси в широком диапазоне значений коэффициента избытка горючего для заранее перемешанной [2] и не перемешанной смесей [1, 3] при одновременном зажигании смеси по всей высоте слоя. В данной работе исследуется зависимость вероятности ПГД от расположения точечного искрового источника зажигания.

Экспериментальная установка представляет собой щелевую камеру сгорания с системой отдельной подачи горючего (этилена) и окислителя (кислорода), систему зажигания и систему диагностики [3]. Расход смеси в эксперименте определяется давлениями горючего и окислителя в ресиверах и их соотношением. Эксперименты проведены для малых (1,4-2 л/с) и больших (6-7 л/с) расходов смеси при стехиометрическом соотношении горючего и окислителя. Теоретическая скорость детонации в такой смеси равна 2376 м/с. Вдоль щелевого зазора установлены 4 датчика давления. В экспериментах точечный источник зажигания располагается либо вблизи нижней границы слоя смеси (на высоте 15 мм от днища камеры), либо в середине слоя, либо вблизи верхней границы слоя.

При зажигании вблизи верхней границы слоя фронт пламени распространяется не только горизонтально вдоль щели, но и вертикально вниз, создавая область повышенного давления у днища камеры, где находится свежая смесь, т.е. создавая благоприятные условия для ПГД. Показано, что при размещении точки зажигания вблизи верхней границы слоя вероятность ПГД возрастает. При больших расходах смеси характерная скорость детонации достигала 2290 м/с, что свидетельствовало о неполном смешении компонентов. При уменьшении расхода смеси для создания слоя той же высоты требовалось больше времени, что улучшало смешение горючего и окислителя на молекулярном уровне: при малых расходах смеси характерная скорость детонации достигала 2460 м/с.

### Список литературы

1. Shamshin I.O.; Ivanov V.S.; Aksenov V.S.; Gusev P.A.; Avdeev K.A.; Frolov S.M. // Aerospace. 2023. Vol.10. P. 988.
2. Shamshin I.O.; Ivanov V.S.; Aksenov V.S.; Gusev P.A.; Frolov S.M. // Energies. 2023. Vol 16. 1098.
3. Шамшин И. О., Иванов В. С., Аксенов В. С., Гусев П. А., Авдеев К. А., Фролов С. М. // Горение и взрыв. 2023. т. 16 №4. с. 35-62.

Т.А. РОСТИЛОВ<sup>1</sup>, В.С. ЗИБОРОВ<sup>1</sup>, Е.В. КРОНРОД<sup>2,3</sup>, И.А. КУЗНЕЦОВ<sup>4</sup>, Г.Г. ДОЛЬНИКОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

<sup>4</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

## УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ФИЗИЧЕСКОМ АНАЛОГЕ МАРСИАНСКОГО РЕГОЛИТА

Исследована ударная сжимаемость песка с физическими свойствами (плотность, распределение частиц по размерам) аналогичными некоторым типам верхних слоев марсианского реголита. Показано, что в диапазоне давлений 0.5–1.1 ГПа толщина фронта ударной волны в этом веществе сравнима со средним размером частиц (95 мкм), а уже при более высоком давлении 1.7 ГПа – с наименьшим размером частиц (20 мкм).

T.A. ROSTILOV<sup>1</sup>, V.S. ZIBOROV<sup>1</sup>, E.V. KRONROD<sup>2,3</sup>, I.A. KUZNETSOV<sup>4</sup>, G.G. DOLNIKOV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for High Temperatures, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

<sup>4</sup>Space Research Institute, RAS, Moscow, Russia

## SHOCK WAVES IN PHYSICAL ANALOG OF MARTIAN REGOLITH

The shock compressibility of sand with the physical properties (density, particle size distribution) analogous to some types of upper layers of Martian regolith is studied. It is shown that in the pressure range of 0.5–1.1 GPa, the thickness of the shock wave front in this medium is comparable to the average particle size (95 μm). However, at a higher pressure of 1.7 GPa, it is rather comparable to the smallest particle size (20 μm).

В качестве материала образцов был выбран песок с начальной плотностью  $1.3 \text{ г см}^{-3}$  и размерами частиц от 20 до 180 мкм. Эти параметры в целом соответствуют реголиту на поверхности Марса [1, 2]. Данные о сжимаемости подобных веществ необходимы для анализа и моделирования ударных процессов, происходивших на этой планете, а также тех, которым ещё предстоит произойти.

В экспериментах образцы песка содержались в цилиндрической капсуле с толщиной 4 мм. Покоящаяся капсула нагружалась плоскими дюралевыми или медными ударниками, разогнанными до скоростей 300–900 м с<sup>-1</sup>. В результате были достигнуты давления от 0.5 до 1.7 ГПа. Профили ударных волн были получены с помощью лазерного интерферометра VISAR [3]. Их регистрация позволила продемонстрировать как изменяется структура ударной волны с увеличением нагружения. На Рис. 1 изображены зависимости толщины фронта волны, выраженной через средний (95 мкм), максимальный (180 мкм) и минимальный (20 мкм) размер частицы, от давления.

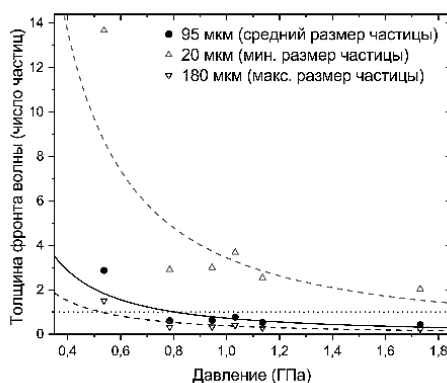


Рис. 1. Зависимость толщины фронта ударной волны, выраженной через средний, максимальный и минимальный размер частицы, от давления за фронтом ударной волны. Пунктирная линия разграничивает области, где толщина больше или меньше одной частицы, соответственно.

Толщина фронта уменьшается с ростом давления, и в области от 0.5 до 1.1 ГПа она сравнима со средним размером частиц. Однако уже при давлении 1.7 ГПа величина минимального размера частиц лучше характеризует толщину фронта. Такая картина в целом согласуется с литературными данными по гранулированным средам [4].

### Список литературы

1. Delage P., Marteau E., Vrettos C., et al. // In Proceedings 20th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering. 2022.
2. Zent A.P., Hecht M.H., Cobos D.R., et al. // J. Geophys. Res. Planets. 2010. V. 115. E00E14.
3. Barker L.M., Hollenbach R.E. // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. P. 4669.
4. Neal W.D., Chapman D.J., Proud W.G. // AIP Conf. Proc. 2012. V. 1426. P. 1443.



М.А. ПАРАМОНОВ, Д.В. МИНАКОВ, П.Р. ЛЕВАШОВ  
*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ КВАНТОВОЙ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ**

Изучены термодинамические свойства металлов, в том числе в сверхкритическом состоянии, при помощи моделирования методом квантовой молекулярной динамики без привлечения экспериментальных данных. В рамках одной первопринципной модели изучаются давление, энтальпия и тепловое расширение; последовательно выполняется интерпретация экспериментальных данных по адиабатическому и изобарическому расширению; производится оценка кривых сосуществования жидкость—газ и критических точек для W, Mo и Zr на основе численных расчетов.

M.A. PARAMONOV, D.V. MINAKOV, P.R. LEVASHOV  
*Joint Institute for High Temperatures RAS, Moscow, Russia*

## **STUDY OF HIGH TEMPERATURE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF METALS BY THE METHOD OF QUANTUM MOLECULAR DYNAMICS**

The thermodynamic properties of metals, including those in the supercritical state, were studied using quantum molecular dynamics modeling without the use of experimental data. One first-principles model examines pressure, enthalpy, and thermal expansion; interpretation of experimental data on adiabatic and isobaric expansion is carried out consistently; Liquid-gas coexistence curves and critical points for W, Mo and Zr are assessed based on numerical calculations.

Знание высокотемпературных теплофизических свойств материалов атомной энергетики, их уравнений состояния (УРС), крайне необходимо для анализа ядерной безопасности и моделирования поведения атомных реакторов при критических воздействиях. Однако их свойства в жидкой фазе до сих пор известны лишь приблизительно.

Область жидкой фазы вещества и сверхкритическое состояние могут быть достигнуты в экспериментах по адиабатическому расширению. Однако, доступно только несколько измерений температуры в сжатых металлах, а также аналогичные измерения в волнах изоэнтропического расширения. Кроме того, особое значение имеют термодинамически полные данные, полученные с использованием метода изобарического расширения (ИЕХ). Однако интерпретация экспериментов ИЕХ часто затруднена из-за скорости и сложности происходящих физических явлений. Этот факт может объяснить часто встречающееся несоответствие между экспериментальными данными по изобарическому расширению для некоторых металлов, что ярко наблюдается для тугоплавких, в том числе для вольфрама, молибдена и циркония. Эти металлы имеют большое значение из-за их уникальных свойств: высокой механической прочности, высокой температуры плавления, исключительной стойкости к нагреву и коррозии, а также хорошей электропроводности. Однако высокая температура плавления затрудняет измерение их теплофизических свойств.

В связи с этим, в данной работе мы представляем результаты первопринципных расчетов методом квантовой молекулярной динамики (КМД), которые позволили выполнить теоретическую интерпретацию экспериментальных данных по импульсному нагреву, ударному сжатию и изоэнтропическому расширению и сделать оценку параметров критических точек вольфрама, молибдена и циркония, положения кривых сосуществования фаз жидкость—газ и, таким образом, устранить неопределенность в знании теплофизических свойств тугоплавких металлов, особенно в жидком состоянии. Метод КМД основан на теории функционала электронной плотности (DFT - density functional theory), но также учитывает движение ионов. В настоящее время в расчетах могут использоваться более 1000 атомов, что позволяет изучать неупорядоченные системы и даже фазовые переходы. Это делает КМД перспективным методом для описания высокотемпературных свойств циркония в широком диапазоне параметров. Для выполнения первопринципного моделирования использовался программный код VASP.

В данной работе на основе табличного УРС из КМД расчетов были рассчитаны ударные адиабаты и изоэнтропы разгрузки, восстановлены критические изобары, выполнена оценка кривых сосуществования жидкость--газ и изобар нормального давления на фазовых диаграммах вольфрама, молибдена и циркония. Полученные новые данные помогут улучшить существующие определяющие соотношения для этих металлов, исключив неопределенность в их теплофизических свойствах при высоких температурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (Грант № 20-79-10398).

С.А. ГУБИН, Ю.А. БОГДАНОВА, С.А. КОЗЛОВА, И.В. МАКЛАШОВА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ХИМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ЖИДКОГО БЕНЗОЛА В УДАРНЫХ ВОЛНАХ В АТОМИСТИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ МАСШТАБАХ**

В молекулярно-динамических расчетах разложения жидкого бензола в ударных волнах отсутствует фазовое превращение нано-графита в наноалмаз, которое воспроизводится термодинамическими расчетами и наблюдается экспериментально в виде излома на ударных адиабатах в обычных крупномасштабных. Сопоставление разномасштабных экспериментальных и расчетных данных в атомистических масштабах с результатами опытов и расчетов в обычных ударных волнах (УВ) позволяет исследовать процессы химического разложения углеводородов в УВ.

S.A. GUBIN, Yu.A. BOGDANOVA, S.A. KOZLOVA, I.V. MAKLASHOVA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **CHEMICAL DECOMPOSITION OF LIQUID BENZENE IN SHOCK WAVES ON ATOMYSTIC AND REAL SCALES**

In molecular dynamics calculations of the decomposition of liquid benzene in shock waves, there is no phase transformation of nano-graphite into nanodiamond, which is reproduced by thermodynamic calculations and observed experimentally in the form of a break in shock Hugoniot adiabats in ordinary large-scale ones. Comparison of different-scale experimental and calculated data on an atomistic scale with the results of experiments and calculations in conventional hydrocarbons makes it possible to study the processes of chemical decomposition of hydrocarbons in hydrocarbons.

Химические реакции при ударно-волновом сжатии жидкого бензола трудно отследить экспериментально из-за коротких временных масштабов и быстрым началом оптической непрозрачности. Тем не менее, первые химические реакции, вызванные сжатием в ударных волнах (УВ), важны для понимания разложения энергетических веществ и путей синтеза новых углеводородных материалов.

Атомистическое молекулярно-динамическое моделирование позволяет выяснять ранние этапы химического разложения  $C_6H_6$  в ударных волнах. Надежность прогнозов МД подтверждается совпадением рассчитанного времени начала разложения бензола в нано-УВ, создаваемых лазерными разрядами в тоже атомистических масштабах (пс и нм) [1]. Однако, начало разложения  $C_6H_6$  в нано-УВ происходит при более высоких давлениях (~ на 40%) по сравнению с обычными УВ (в масштабах сотен нс, мкс и микрон), возбуждаемыми традиционными методами взрыва или метания. Результаты МД моделирования согласуются с экспериментальными данными, полученными в нано-УВ. При этом, в МД расчетах отсутствует фазовое превращение нано-графита в наноалмаз, которое воспроизводится термодинамическими расчетами и наблюдается экспериментально в виде излома на ударных адиабатах в обычных УВ [2].

Такое разномасштабное сопоставление экспериментальных и расчетных данных по ударно-волновому сжатию жидкого бензола в атомистических масштабах с подобными результатами опытов и расчетов в обычных масштабах позволяет лучше понять процессы и характеристики химического разложения углеводородов в УВ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031)

### *Список литературы*

1. Bowlan P. // J. Chem.Phys. 2019. Vol. 150. P. 204503.
2. Nellis W.J., Ree F.H. et.al. // J. Chem.Phys. 1984. Vol. 80. P. 2789.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Показано применение формализма Грина-Кубо для расчета теплопроводности молекулярных кристаллов на примере 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана на основе молекулярно-динамического моделирования. Применён метод фильтрации тепловых потоков в конденсированных средах, реализованный на основе открытого программного пакета LAMMPS. Для оптимизации параметров расчета теплопроводности разработан алгоритм, реализованный в виде компьютерной программы, для прямой обработки результатов МД-моделирования.

A.A. EGOROV, Y.A. BOGDANOVA, I.V. MAKLASHOVA, A.S. SMAL  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF MOLECULAR CRYSTALS BY MOLECULAR DYNAMICS METHODS

The application of the Green-Kubo formalism for calculating the thermal conductivity of molecular crystals as an example 1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetraazacyclooctane based on molecular dynamics simulations is shown. A method for filtering heat flows in condensed matter, implemented based on the open-source LAMMPS software package, was used. To optimize the parameters for calculating thermal conductivity, an algorithm has been developed, implemented in the form of a computer program, for direct processing of MD modeling results.

Определение теплопроводности молекулярных кристаллов имеет критическое значение для понимания их термических характеристик. Методика расчета коэффициента теплопроводности с использованием равновесного молекулярно-динамического (МД) моделирования основывается на использовании формализма Грина-Кубо, в котором коэффициент теплопроводности представляется как интеграл по времени спонтанных тепловых потоков. Однако применимость данного метода в основной степени ограничивается медленной сходимостью интегралов к истинному значению коэффициента.

В LAMMPS [1] тепловой поток для системы, состоящей из  $N$  атомов, определяется следующим выражением:  $J = \sum \varepsilon v - \sum S v$ , где  $\varepsilon$  - энергия атома,  $v$  - скорость атома,  $S$  - тензор напряжения одного атома, суммирование происходит по всем  $N$  атомам в системе. При анализе величин, зависящих от координат в твердых телах, принято раскладывать их в ряд Тейлора по смещениям атомов относительно их положения с минимальной потенциальной энергии. Разложения для  $u$  и  $S$  для типичных гамильтонианов, используемых в МД, начинаются с членов нулевого порядка, которые представляют соответственно потенциальную энергию атома и его напряжение в системе с минимальной энергией. Таким образом, члены низшего порядка в разложении теплового потока не дают вклад в коэффициент теплопроводности, так как они представляют собой производную по времени ограниченной функции времени [2].

В данной работе продемонстрировано применение фильтра тепловых потоков, основанного на данной теории, что значительно повышает скорость сходимости интеграла в формализме Грина-Кубо (рис. 1).

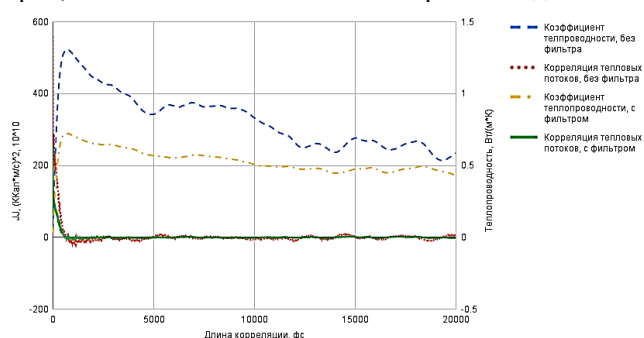


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента теплопроводности от длины корреляционной функции с использованием фильтра (штрихпунктирная линия) и без него (пунктирная линия)

Полученные значения коэффициента теплопроводности согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 8 «Физика изотопов водорода», направление 8.1 " Исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом").

### Список литературы

1. S. Plimpton, Fast parallel algorithms for short-range molecular dynamics. // J. Comput. Phys. 117, 1 (1995), <https://www.lammps.org/>
2. Marcolongo, A., Ercole, L., & Baroni, S. Gauge fixing for Heat-Transport simulations. // Journal of Chemical Theory and Computation (2020), 16(5), 3352–3362.

А.А. СУРАЕВА, Ю.А. БОГДАНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАСЧЕТ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ИЗОТОПОВ ГЕЛИЯ И ВОДОРОДА МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Проведены серии расчетов для определения коэффициентов вязкости изотопов гелия и водорода. Обоснованы правила смешения для коэффициентов вязкостей смесевых композиций изотопов водорода и гелия. Представлены аналитические зависимости значения коэффициента вязкости от температуры и давления для индивидуальных изотопов гелия и водорода.

A.A. SURAEVA, YU.A. BOGDANOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF VISCOSITY OF GAS MIXTURES OF HELIUM AND HYDROGEN ISOTOPES BY MOLECULAR DYNAMICS METHOD

A series of calculations were carried out to determine the viscosity coefficients of helium and hydrogen isotopes. The mixing rules for the viscosity coefficients of mixed compositions of hydrogen and helium isotopes are substantiated. Analytical dependences of the viscosity coefficient on temperature and pressure for individual isotopes of helium and hydrogen are presented.

Вязкость газа определяется парными соударениями составляющих его частиц. Молекулярно-кинетическая теория объясняет вязкость движением и взаимодействием молекул. Данные о вязкости газов также важны в химической промышленности при проектировании и оптимизации процессов смешивания газов, реакций и других технологических операций.

В рамках данной работы исследовались свойства переноса, в частности вязкость, изотопов гелия и водорода, а также зависимость вязкости от температуры.

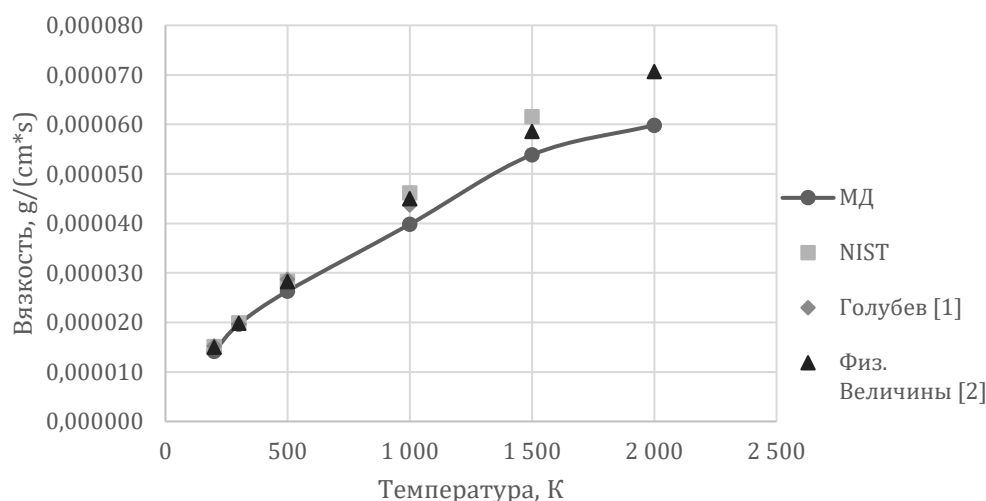


Рис. 1. Вязкость гелия в зависимости от температуры при 1 атм.

Были проведены расчеты для определения коэффициентов вязкости бинарных смесей изотопов гелия и водорода с использованием теоретического уравнения состояния двухкомпонентных систем [3], методом молекулярной динамики и на основе разработанных аппроксимационных выражений на различных изотермах от 200 до 2000 К при атмосферном давлении.

В результате проведенных исследований были обоснованы правила смешения для коэффициента вязкости смесей изотопов гелия и водорода по соответствующим значениям индивидуальных компонентов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания № FSWU-2023-0031).

### Список литературы

1. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей (Справочное руководство). М.: ГИФМЛ, 1959, 375 с.
2. Физические величины : Спр. / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М., Энергоатомиздат, 1991. С. 365.
3. Bogdanova Yu.A., Gubin S.A., Victorov S.B., Gubina T.V. A theoretical model of the equation of state of a two-component fluid with the Exp-6 potential based on perturbation theory // High Temperature. 2015. V. 53. № 4. P. 481–490.

А.С. ШИПАКЦЯН<sup>1,2</sup>, Д.Г. КВАШНИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия  
<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МУАРОВЫХ ДИАМАНОВ

В работе было проведено моделирование наноиндентирования для мембран с различными углами поворота между слоями и различной степенью покрытия водородом. Для различных структур были получены числа межслоевых связей и  $sp^3$  – гибридинизированных атомов. Также были получены значения предельных деформаций для различных структур.

A.S. SHIPAKTSYAN<sup>1,2</sup>, D.G. KVASHNIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
<sup>2</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INVESTIGATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF MOIRE DIAMONES

In this work, nanoindentation was simulated for membranes with different rotation angles between layers and varying degrees of hydrogen coating. The numbers of interlayer bonds and  $sp^3$  – hybridized atoms were obtained for various structures. The values of the ultimate deformations for various structures were also obtained.

В последнее время углеродные наноматериалы дополнились структурами на основе графена - слоя толщиной в один атом [1]. Они привлекают внимание исследователей не только уникальными свойствами, но и перспективой широкого применения в электронике, сенсорике, материаловедении и био-медицине. Известно также, что получают и наноструктуры из двух и более слоев графена (биграфен со структурой Бернала АВ), отличающимися от самого графена механическими и электронными свойствами [2]. Также предполагается существование структур, получаемых полным или частичным гидрированием биграфена, называемых алмазанами. Одной из отличительных особенностей этого вещества является его высокий показатель прочности [3]. И именно поэтому для нас представляют интерес прочностные характеристики алмазанов.

В данной работе с помощью метода классической молекулярной динамики были получены модули упругости для алмазанов с различными углами поворота между слоями и различной степенью покрытия водородом.

Расчеты проводились в программном пакете LAMMPS с использованием межатомного потенциала AIREBO [4]. Потенциал AIREBO основан на эмпирических данных и учитывает как обменные, так и валентные эффекты. Потенциал AIREBO позволяет моделировать реакции связей между атомами углерода, включая их образование и разрыв, что делает его полезным инструментом для изучения механических свойств углеродных материалов.

### Список литературы

1. D.C. Elias, R.R. Nair, T. M. G. Mohiuddin et al., Science 324, 236 (2009).
2. E. J. Duplock, M. Scheffler, and P. J. D. Lindan, Phys. Rev. Lett. 92, 225502 (2004)
3. Л.А. Чернозатонский, П.Б. Сорокин, А.Г. Квашинин, Д.Г. Квашинин. Алмазоподобный нанослой  $C_2H$  – алмазан: моделирование структуры и свойств// ЖЭТФ. 2009 Т. 90. № 2, с. 144-148.
4. URL: [https://docs.lammps.org/pair\\_airebo.html](https://docs.lammps.org/pair_airebo.html) (дата обращения: 25.02.2024)

## ДЕФОРМИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВО-ЛИТИЕВОГО СПЛАВА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

На основе работы [1] рассмотрены результаты изучения механических характеристик алюминий-литиевого сплава 1420 при динамическом нагружении, а также идентификация и верификация параметров модели деформирования Джонсона–Кука по результатам экспериментов.

V.A. PUSHKOV, Y.V. BATKOV

Sarov Physical &amp; Technical Institute - National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia

## ALUMINIUM-LITHIUM ALLOY DEFORMATION UNDER DYNAMIC LOADING

Based on paper [1] the results of aluminium-lithium alloy 1420 mechanical properties studies under dynamic loading are considered. Using experimental results, the identification and verification of Johnson-Cook deformation model parameters are discussed also.

Для проектирования различных конструкций актуальным является знание свойств применяемых материалов, а также разработка моделей их поведения при воздействии различных нагрузок, включая динамические. Одним из материалов, часто используемых в авиационной и космической технике, является свариваемый коррозионноустойчивый алюминий-литиевый сплав 1420 [1-3]. По этому сплаву показательна работа [1], где проведены как эксперименты с воздействием динамических нагрузок, так и идентификация и верификация параметров модели деформирования Джонсона–Кука. Опыты проводились на динамическое сжатие и локализованный сдвиг по методу составного стержня Гопкинсона [1, 4]. На рис. 1 приведена схема опытов. В опытах на одноосное сжатие были плоские образцы  $\varnothing 5,5 \times 2$  мм, в опытах на сдвиг применялись шляпкообразные образцы  $\varnothing 10 \times \varnothing 4,6 \times 5$  мм (правая часть рис.1) [1].



Рис. 1. Схема проведения опытов

В опытах на сжатие были реализованы скорости нагружения 4,2-15,3 м/с (скорости деформации 1350-6000 с<sup>-1</sup>), построены диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$ , определены величины пределов текучести  $\sigma_{0,2}=345-360$  МПа. В опытах на сдвиг реализованы скорости нагружения 3,9-4,3 м/с, построены диаграммы «напряжение сдвига-смещение»  $\sigma_s$ - $\Delta$ , определено среднее значение критического напряжения сдвига, соответствующего началу сдвига,  $\sigma_c=369,5$  МПа [1].

Модель Джонсона–Кука [5] является эмпирической формулой, которая учитывает упрочнение и влияние скорости деформирования. Напряжение текучести в модели определяется уравнением:  $\sigma_y = (A + B \cdot \epsilon_p^n)(1 + C \cdot \ln(\dot{\epsilon}^*))$ , где  $\epsilon_p$  – пластическая деформация,  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$  – безразмерная скорость пластической деформации,  $\dot{\epsilon}_0 = 1$  с<sup>-1</sup>,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  – параметры, определяемые из экспериментов [5]. Определение параметров модели выполнялось исходя из информации о пластических деформациях материала при разных интенсивностях деформирования [1].

По экспериментальным и справочным данным были получены следующие параметры модели Джонсона–Кука для алюминий-литиевого сплава 1420:  $A = 284$  МПа,  $B = 427$  МПа,  $n = 0,4$ ,  $C = 0,031$  [1]. Идентификация параметров модели осуществлялась по диаграммам сжатия сплава. Верификация модели показала хорошее согласие расчетных и экспериментальных диаграмм. Максимальная погрешность на участке развитого пластического деформирования не превышает 10%. Для численного расчета локализованного сдвига использовали деформационный критерий разрушения. Критическое напряжение сдвига в опыте и численном расчете, отличались не более, чем на 4,2% [1].

Результаты работы [1] полезны как для проведения прочностных расчетов, так и для моделирования поведения узлов из сплава 1420 в условиях динамических механических воздействий при скоростях деформации до 6000 с<sup>-1</sup>.

## Список литературы

1. В.А.Кузьмин, Ф.Ф.Галиев, В.А.Пушков, Е.С.Шерстобитов, Е.В.Кошатов, С.И.Герасимов, А.Т.Мишустин Исследование деформирования алюминий-литиевого сплава пониженной плотности при ударном сжатии и локализованном сдвиге // Физика металлов и металловедение, 2022, том 123, № 10, с. 1085–1091.
2. Алюминий 1420 в России - характеристики, аналоги // Интернет. Сайт <metatarg.ru/marki-stali-i-splavy>.
3. Будущее авиации — за алюминий-литиевыми сплавами // Интернет. Сайт <<http://rareearth.ru>>.
4. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading // Proc. Phys. Soc. 1949. V. 62 B. P. 676–700.
5. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistic. The Hague, The Netherlands, 1983. P. 541–547.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ В МЁРЗЛЫЙ ГРУНТ**

Рассмотрен класс задач, посвящённый проблеме проникания ударников различной геометрической формы в песчаные среды при разной температуре и влажности песка в широком диапазоне начальных скоростей ударника. Исследовалась задача высокоскоростного соударения контейнера с мёрзлым грунтом и конического мерного стержня (обратный эксперимент). Проведены численные расчёты проникания конусов с различным диаметром основания в замёрзший водонасыщенный грунт при скоростях 100–400 м/с. Проведено сравнение экспериментальных кривых (зависимость максимальной силы сопротивления от скорости) и данных численных расчётов.

O.V. KLYUSHIN, V.A. KUZMIN

Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

**SIMULATION OF THE INTRODUCTION OF CONICAL SHELLS INTO FROZEN SOIL.**

A class of problems devoted to the problems of penetration of impactors of various geometric shapes into sandy environments at different temperatures and humidity of the sand at different initial velocities of the impactor is considered. The problem of high-speed impact of a container with frozen soil and a conical measuring rod was studied (reverse experiment). Numerous calculations of the penetration of cones with different base diameters into frozen water-saturated soil at speeds of 100–400 m/s are presented. A comparison was made between the experimental force curves (dependence of greater resistance on speed) and the data from the above calculations.

На сегодняшний день изучение физико-механических свойств грунтовых сред при отрицательных температурах и динамических нагрузках ударного или взрывного характера является важной технической задачей. Результаты исследований сопротивляемости полубесконечных сред имеют двойственное практическое применение: это и создание проникающих ударников, обладающих требуемыми свойствами, и проектирование противоударных преград. Для проведения численных расчетов ударного взаимодействия конструкций с грунтовыми средам в замороженном состоянии необходимо наличие адекватных моделей мерзлых грунтов, описывающих их деформацию и разрушение в широком диапазоне изменения нагрузок и скоростей деформаций в том числе и при пониженных температурах.

В работе представлено определение параметров математических моделей деформирования мерзлого песчаного грунта для проведения численных расчётов и последующей верификации результатов с данными экспериментов. По приведённым в статье [1] данным была создана трёхмерная модель задачи (рис. 1), на основе которой в программе ЛОГОС была построена расчётная сетка. Затем была создана двумерная модель для расчёта в программе LS-DYNA.

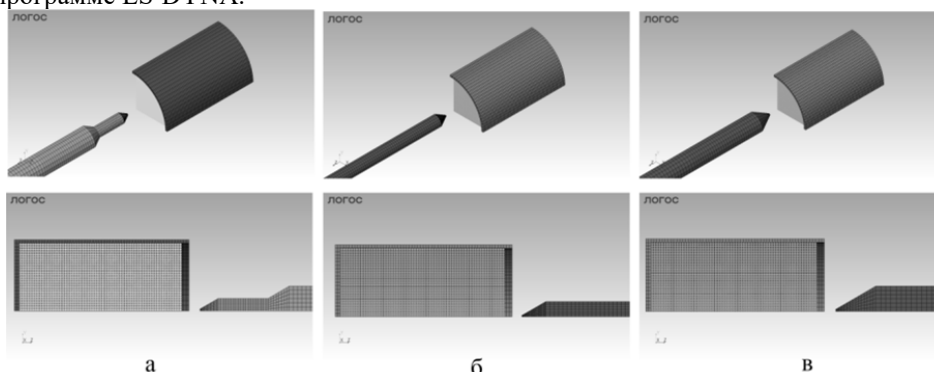


Рис. 1. Конечно-элементные модели, построенные в ПП ЛОГОС (вид сбоку, изометрический вид), диаметры основания стержня: а- d=10 мм, б- d=12 мм, в- d=19,8 мм

В результате численного моделирования были получены безразмерные зависимости максимального значения силы сопротивления внедрению в мёрзлый грунт конусов с различным диаметром основания от скорости удара  $F/F^*(V_0)$ , где  $F$  - максимальная сила сопротивления внедрению,  $F^*=(\rho_0 S_0 V_0^2/2)$  - скоростной напор,  $S_0=(\pi d^2/4)$  - площадь основания конуса,  $V_0$  - начальная скорость соударения,  $\rho_0$  - начальная плотность грунта. Полученные зависимости  $F/F^*(V_0)$  были сопоставлены с экспериментальными, а также расчетными, приведенными в статье [1]. Полученные зависимости показали близкое сходжение с экспериментальными данными. Таким образом, была проведена идентификация и верификация алгоритмов и моделей LS-DYNA для численного моделирования задач высокоскоростного проникания различных ударников в преграды из мёрзлого песчаного грунта.

*Список литературы*

1. А. М. Брагов, В. В. Баландин, В. Л. Котов, В. В. Баландин, Е. Ю. Линник, “Экспериментальное исследование удара и проникания конического ударника в мерзлый песчаный грунт”, // Прикл. мех. техн. физ., 59:3 (2018), 111–120.

Т.А. АДИГАМОВА<sup>1</sup>, М.В. АНТИПОВ<sup>1</sup>, А.Б. ГЕОРГИЕВСКАЯ<sup>1,2</sup>, Д.Н. ЗАМЫСЛОВ<sup>1</sup>,  
М.О. ЛЕБЕДЕВА<sup>1</sup>, А.Д. МАКОВ<sup>2</sup>, К.Н. ПАНОВ<sup>1</sup>, Д.А. ПОЛШКОВ<sup>1</sup>, А.С. СОКОЛОВА<sup>1</sup>, Б.И.  
ТКАЧЕНКО<sup>1</sup>, Е.А. ЧУДАКОВ<sup>1</sup>, И.В. ЮРТОВ<sup>1</sup>, А.О. ЯГОВКИН<sup>1</sup>, А.П. ЯВТУШЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр - Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва, Саров, Россия

<sup>2</sup>СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ДВУХВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА МАССОВО-СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА ЧАСТИЦ, ВЫБРОШЕННЫХ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИРОВАННОГО ОБРАЗЦА ИЗ СВИНЦА**

С помощью методов, основанных на разных физических принципах, получены новые экспериментальные данные о процессе ударно-волнового выброса частиц при двухволновом нагружении полированного образца из свинца, которые используются для создания и совершенствования физико-математических моделей, предназначенных для расчетно-теоретического обоснования работы конструкций.

T.A. ADIGAMOVA<sup>1</sup>, M.V. ANTIPOV<sup>1</sup>, A.B. GEORGIEVSKAYA<sup>1,2</sup>, D.N. ZAMYSLOV<sup>1</sup>, M.O.  
LEBEDEVA<sup>1</sup>, A.D. MAKOV<sup>2</sup>, K.N. PANOV<sup>1</sup>, D.A. POLSHKOV<sup>1</sup>, A.S. SOKOLOV<sup>1</sup>, B.I.  
TKACHENKO<sup>1</sup>, E.A. CHUDAKOV<sup>1</sup>, I.V. YURTOV<sup>1</sup>, A.O. YAGOVKIN<sup>1</sup>, A.P. YAVTUSHENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise "Russian Federal Nuclear Center - All-Russian Research Institute of Experimental Physics", Institute of Experimental Gas Dynamics and Explosion Physics, Sarov, Russia

<sup>2</sup>SarFTI National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia

## **INFLUENCE OF TWO-WAVE LOADING ON THE MASS-VELOCITY CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF PARTICLES EMPLOYED FROM THE SURFACE OF A POLISHED LEAD SAMPLE**

Using methods based on different physical principles, new experimental data on the process of shock wave emission of particles under two-wave loading of a polished lead sample have been obtained, which are used to create and improve physical and mathematical models designed for computational and theoretical substantiation of the work of structures.

Процесс выброса частиц со свободной поверхности (СП) металлов под действием ударной волны (ударно-волновое "пыление") может оказывать значительное влияние на работу устройств для исследования инерциального термоядерного синтеза [1]. Проблема количественного описания ударно-волнового "пыления" остаётся актуальной, что связано с необходимостью построения физически обоснованных математических моделей, используемых для прогнозирования работы конструкций. В результате проведенных ранее исследований получен большой объем информации, связанной с пофакторным влиянием на эффект ударно-индуцированного "пыления" степени обработки свободной поверхности, амплитуды и стационарности УВ, фазового состояния материала, наличия перед свободной поверхностью газа и движения в нем.

Однако вся полученная информация об эффекте ударно-индуцированного "пыления" относится к случаю выхода на свободную поверхность одной УВ. В ряде практически важных случаев на свободную поверхность образца может выходить последовательность двух и более УВ. После выхода на СП первой УВ, имеющей за фронтом спад давления и массовой скорости и приводящей к дроблению образца, через промежуток времени от 3 до 4 мкс выходит вторая УВ – волна компактирования. Выход второй волны может приводить к дополнительному выбросу вещества со сформированной поверхности, имеющей, по-видимому, пористую структуру в приповерхностном слое. Вопрос о том, чем обусловлено "вторичное пыление" с этой поверхности, и связано ли оно с исходными параметрами шероховатости поверхности, остается недостаточно изученным.

Протонографическим методом определено распределение плотности во всем разрушенном образце из свинца [2], [3]. Это позволило измерить значение удельной массы вещества, выброшенной со свободной поверхности. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с другими независимыми методами: гетеродин-интерферометра (PDV) [4] и пьезоэлектрического датчика [5]. Показано, что удельная масса вещества в потоке частиц до поверхности образца, выброшенная при двухволновом нагружении полированного образца из свинца составляет  $\approx 200$  мг/см<sup>2</sup>, что значительно больше чем при одноволновом нагружении -  $\approx 5$  мг/см<sup>2</sup>. Это свидетельствует о том, что поверхность, сформированная в результате разрушения и последующего компактирования образца, значительно отличается от исходной.

### *Список литературы*

1. Ogorodnikov V. A., Ivanov A. G., Mikhailov A. L., Kryukov N. I., Tolochko A. P., Golubev V. A. On the emission of particles from the free surface of metals when a shock wave enters it and methods for diagnosing these particles // Physics of gorenje i explosion. 1998. vol. 34, No. 6. Pp. 103-107.
2. Burtsev V. V., Lebedev A. I., Mikhailov A. L., Ogorodnikov V. A., Oreshkov O. V., Panov K. N., Rudnev A.V., Svirsky O. V., Syrunin M. A., Trutnev Yu. A., Khramov I. V. Multi-frame protonography - a method for studying fast-flowing hydrodynamic processes // Physics of gorenje i explosion. 2011. Vol. 47, No. 6. Pp. 16-28.
3. Non-disturbing methods of diagnostics of fast-flowing processes. Monograph / Edited by A. L. Mikhailov. Sarov: FSUE RFNC-VNIIEF, 2015.
4. Dolan D. H. Extreme measurements with photonic Doppler velocimetry (PDV) // Rev. Sci. Instrument. 2020. V.91. –P. 051501.
5. Antipov M. V., Yurtov I. V., Utenkov A. A., Blinov A.V., Sadunov V. D., Trishchenko T. V., Ogorodnikov V. A., Mikhailov A. L., Glushikhin V. V., Vishnevetsky E. D. Application of the piezoelectric method for measuring parameters of shock-induced dust flows // XIX Kharonov thematic scientific readings: tr. international Conference – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2017.



А.Ю. НЕМЫГИН, Ю.В. БАТЬКОВ, Т.О. СКЛЯДНЕВА, А.М. ПОДУРЕЦ,  
И.Р. ТРУНИН, Е.Е. ШЕСТАКОВ

*Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского  
ядерного университета МИФИ, Саров, Россия*

## **ОТКОЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н10Т, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ**

Представлены результаты динамических прочностных характеристик образцов на основе порошка из стали 12Х18Н10Т, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления и проведено сравнение их со свойствами стали, полученной по традиционной технологии горячекатаного проката, при ударно-волновом нагружении в диапазоне давлений сжатия от 3 до 9 ГПа.

A.Yu. NEMYGIN, Yu.V. BATKOV, T.O. SKLYADNEVA, A.M. PODURETS,  
I.R. TRUNIN, E.E. SHESTAKOV

*SarFTI National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia*

## **SPAWL FRACTURE OF 12X18H10T STEEL SPECIMENS MANUFACTURED BY SELECTIVE LASER MELTING**

The results of the dynamic strength characteristics of samples based on powder from steel 12X18H10T, manufactured using selective laser melting technology are presented and compared with the properties of steel produced using traditional hot-rolled technology, under shock wave loading in the compression pressure range from 3 to 9 GPa.

Технология селективного лазерного плавления (СЛП) является методом аддитивного производства (выборочное послойное наращивание материала) сложных изделий посредством лазерного плавления металлического порошка по математическим САД моделям [1]. В настоящее время интенсивно ведется отработка технологического процесса построения трехмерных деталей методом СЛП. При этом детали, изготовленные таким способом, должны не только точно соответствовать геометрическим размерам, но и выполнять требования по механическим статическим и динамическим свойствам, предъявляемым к деталям в эксплуатационном диапазоне нагрузок.

Представлены результаты начатого цикла исследований по определению динамических прочностных характеристик образцов на основе порошка из стали 12Х18Н10Т, изготовленных по технологии селективного лазерного плавления [2] и традиционной технологии стали, полученной по традиционной технологии горячекатаного проката, при ударно-волновом нагружении в диапазоне давлений сжатия от 3 до 9 ГПа.

Нагружение образцов осуществляли ударом высокоскоростного ударника-пластины, разогнанным в стволе легкогазовой пушки со скоростями до 350 м/с. В экспериментах с помощью методики PDV проводилась регистрация скорости движения свободной поверхности образца-мишени. После опытов, сохраненные образцы разрезали и определяли степень их разрушения.

Отметим, что в области ударно-волновых нагрузок результаты по определению прочностных характеристик СЛП-материалов ограничены единичными экспериментами на небольшом количестве СЛП-материалов [2-4]. Результаты, представленные в данной работе, кроме использования их при конструировании деталей из СЛП стали 12Х18Н10Т, пополнят базу данных по свойствам материалов, а также будут использованы для построения численных моделей поведения веществ, применение которых в расчетах прогнозирует работу изделий, работающих в условиях высокоскоростных нагрузок.

### *Список литературы*

1. V.A. Valetov Additive technologies (state and prospects). Tutorial. St. Petersburg, ITMO University. 2015. 63 p.
2. T.O. Sklyadneva, I.R. Trunin, I.V. Pikulin, V.G. Simakov et al. Spall fracture of samples made of steel 12X18H10T made by selective laser melting // XXIII Kharitonov Scientific Readings. Sarov, 2022.
3. S.V. Razorenov, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh et al. Dynamic strength of titanium alloy VT6 obtained by direct laser growth // Physical mesomechanics. - 2021. – Vol. 24, No. 3. – pp. 17-25.
4. S.V. Razorenov, G.V. Garkushin, A.S. Savinykh et al. Spall strength of steel 09XH2MD, obtained by hot rolling and direct laser growth, in the submicrosecond range of load duration // Physical mesomechanics - 2022. – Vol. 25, No. 5. - pp. 57-65.

Р.А. МУРЗИН, В.Н. КНЯЗЕВ, А.Б. ГЕОРГИЕВСКАЯ, Р.А. ВОРОНКОВ

<sup>1</sup> ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, г. Саров, Россия

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДЛЯ УРС «ШОК» НЕРЕАГИРУЮЩЕГО ВЗРЫВЧАТОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ТАТБ

Методом численного моделирования было проведен расчет взрывчатого состава на основе ТАТБ. Проведены обзоры уравнения состояния «Shock», экспериментов по сжатию нереагирующих взрывчатых составов на основе ТАТБ, ударно-волновых экспериментов и изотермического сжатия в алмазной наковальне. Определены параметры для УРС «Shock» и проведена их верификация в лагранжевом решателе. Оценены соответствия полученных данных.

R.A. MURZIN, V.N. KNYAZEV, A.B. GOEORGIEVSKAYA, R.A. VORONKOV

<sup>1</sup> FSUE RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia

<sup>2</sup> Sarov Institute of Physics and Technology, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Sarov, Russia

## PARAMETRIC IDENTIFICATION FOR THE "SHOCK" STATE EQUATION OF A NON-REACTING EXPLOSIVE COMPOSITION BASED ON TATB

The explosive composition based on TATB was calculated using the numerical modeling method. Reviews of the Shock equation of state, compression experiments on non-reacting explosive compositions based on TATB, shock wave experiments and isothermal compression in a diamond anvil are carried out. The parameters for the "Shock" EOS were determined and their verification was carried out in the Lagrangian solver. The consistency of the obtained data was assessed.

В настоящее время насчитывается множество различных взрывчатых веществ (ВВ) и составов, используемые для различных целей в военном, промышленной и научном применении, и имеют различные характеристики, такие как состав, чувствительность к внешним воздействиям, критический диаметр и т.д. В работе рассматривается ВВ на основе ТАТБ, которое является малочувствительным для изучения его стойкости к различным внешним воздействиям, которые могут проявляться при транспортировке и хранении.

Для моделирования процессов, происходящих при рассматриваемой ситуации, необходимо знать его уравнение состояния. Уравнение состояние вещества является объединяющим необходимые для численного расчет термодинамические параметры.

В данной работе выполнено определение параметров УРС в форме «Shock» на основе экспериментов по ударно-волновому и изотермическому сжатию нереагирующего ТАТБ и составов на его основе (PBX 9502) и проведение верификации этих параметров в численных расчетах.

### Список литературы

1. Rodionov A.V., Belsky V.M., Bogdanov E.N., Mikhailov A.L., Komissarov V.V., Sedov A.A. Determination of the depth of detonation excitation by the radio wave method in plasticized octogen and TATB // Proceedings of the international conference "XI Kharitonov thematic scientific readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock waves." March 16-20, 2009. Sarov - Sarov: RFNC-VNIIEF, 2009, p. 69-73. Dick J.J., Forest C.A. et al., The Hugoniot and shock sensitivity of a plastic-bonded TATB explosive PBX 9502 (Journal of Applied Physics, 63, 1988).
2. Gustavsen R.L., Measurements of shock initiation in the triamino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502: Wave forms from embedded gauges and comparison of four different material lots (Journal of Applied Physics, 99, 2006).
3. Zaug J.M., Bastea S. et al., The equation of state of 5-nitro-2,4-dihydro-1,2,4-triazol-3-one determined via insitu optical microscopy and interferometry measurements (Journal of Applied Physics, 119, 2016).
4. Stevens L.L., Velisavljevic N. et al., Hydrostatic Compression Curve for Triamino-Trinitrobenzene Determined to 13.0 GPa with Powder X-Ray Diffraction (Propellants, Explosives, Pyrotechnics 33, No. 4, 2008).
5. Rykounov A.A., Investigation of the pressure dependent thermodynamic and elastic properties of 1,3,5-triamino-2,4,6-trinitrobenzene using dispersion corrected density functional theory (Journal of Applied Physics, 117, 2015).
6. LASL Explosive property data// Los Alamos data center for dynamic materials properties. - 1980. - P. 156-157.

И.В. Маклашова<sup>1</sup>, А.Д. Шлыков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

## ПОЛУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ JWЛ

Предложен алгоритм получения параметров уравнения состояния JWЛ методом дифференциальной эволюции машинного обучения на основе термодинамического моделирования свойств продуктов детонации

I.V. MAKLASHOVA<sup>1</sup>, A.D. SHLYKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

## OBTAINING PARAMETERS OF THE JWЛ EQUATION OF STATE

An algorithm has been proposed for obtaining the parameters of the JWЛ equation of state using the differential evolution method of machine learning based on thermodynamic modeling of the properties of detonation products.

Для описания свойств продуктов детонации (ПД) большинства взрывчатых веществ наиболее часто используется эмпирическое уравнение состояния (УРС) типа Ми-Грюнайзена Джонса - Уилкинса - Ли (уравнение JWЛ) [1, 2], имеющее вид:

$$p_{pd}(\rho_{pd}, e_{pd}) = A \left[ 1 - \frac{\omega}{R_1 V_{pd}} \right] \exp(-R_1 V_{pd}) + B \left[ 1 - \frac{\omega}{R_2 V_{pd}} \right] \exp(-R_2 V_{pd}) + \omega \rho_{pd} (e_{pd} - e_0)$$

где  $V_{prod} = \frac{\rho_0}{\rho_{pd}}$  – коэффициент расширения продуктов детонации,  $p_{pd}$  – давление продуктов детонации,  $A, B,$

$C, R_1, R_2$  и  $\omega$  являются параметрами, специфичными для каждого взрывчатого материала. Первый член уравнения определяет поведение ПД при очень высоких давлениях и низкой степени расширения, второй дополнение относится к зоне промежуточного давления, а третий член описывает изэнтропическое расширение в области низкого давления, соответствующей большой степени расширения. В этом контексте только параметр  $\omega$  имеет физический смысл и приблизительно удовлетворяет соотношению  $\omega=1-\gamma$ , где  $\gamma$  – политропная постоянная для ПД при сильном расширении продуктов при давлении, близком к атмосферному, т.е. расширения идеального газа с эффективным показателем адиабаты  $1+\omega$ .

Для термодинамического моделирования параметров детонации и дальнейшего расширения ПД применялись физически обоснованные модели уравнений состояния многокомпонентного флюида, основанные на теории возмущений и конденсированного наноглерода [3]. Такие расчеты дают возможность определять параметры детонации с высокой точностью [3, 4], обеспечивая хорошее согласие с экспериментальными данными. На основе термодинамического расчета получены характеристики продуктов детонации в точке Чепмена-Жуге: давление, скорость детонации, теплота взрывчатого разложения, состав, температура и другие термодинамические и теплофизические свойства, а также свойства ПД при изэнтропическом расширении от точки Чепмена-Жуге до атмосферного давления ( $p_{pd}, \rho_{pd}, e_{pd}$ ).

Для подбора параметров УРС JWЛ использовался метод дифференциальной эволюции [5] машинного обучения с использованием функций библиотеки SciPy [6]. На каждом итерационном шаге оптимизации коэффициентов  $A, B, C, R_1, R_2$  и  $\omega$  по термодинамическим данным изэнтропического расширения ( $p_{pd}, \rho_{pd}, e_{pd}$ ) определяются свойства ПД в точке Чепмена-Жуге и проверяется выполнение всех условий сохранения.

Полученные значения параметров УРС JWЛ тестовых веществ с высокой точностью воспроизводят значения давления, скорости детонации в точке Чепмена-Жуге, давление на изэнтропе расширения ПД и могут быть использованы в прикладных расчетах взрывных процессов для расчета свойств продуктов в произвольной точке пространства  $p_{pd}(\rho_{pd}, e_{pd})$ .

### Список литературы

1. Lee E.L., Hornig H.C., Kury J.W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCRL-50422, Livermore, California, USA, 1968
2. Urtiew, P.A., Hayes, B. Parametric study of the dynamic JWЛ-EOS for detonation products. // *Combust Explos Shock Waves* 27, 505–514 (1991). <https://doi.org/10.1007/BF00789568>
3. Викторов С.Б., Губин С.А., Маклашова И.В., Пепекин В.И. Прогнозирование детонационных характеристик безводородных взрывчатых веществ // *Химическая физика*. 2005. Т. 24. № 12. С. 22-45.
4. Victorov S.B., El-Rabii H., Gubin S.A., Maklashova I.V., Bogdanova Yu.A. An Accurate Equation-of-State Model for Thermodynamic Calculations of Chemically Reactive Carbon-Containing Systems. // *Journal of Energetic Materials* 2010, 28:sup1, 35-49, <https://doi.org/10.1080/07370652.2010.491496>
5. Storn R., Price K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. // *Journal of Global Optimization* 11, 341–359 (1997). <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>
6. <https://docs.scipy.org/doc/>

**ВЛИЯНИЕ N-ДОПИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ НА ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМ**

Рассмотрены физико-химические механизмы, методы функционализации и модифицирования углеродных наноматериалов (УНМ) допированных азотом. Предполагается, что углеродные наноматериалы (УНМ), а именно допированные азотом углеродные нанотрубки (N-УНТ) способны оказать значительное влияние на скорость термического разложения, электропроводность и каталитические свойства новых материалов.

S. O. BEKBOSSYNVA

Kazakh National University Al Farabi

**EFFECT OF N-DOPED CARBON NANOMATERIALS ON THE THERMAL DECOMPOSITION OF ENERGY-INTENSIVE SYSTEMS**

The physicochemical mechanisms, methods of functionalization and modification of carbon nanomaterials (CNMs) doped with nitrogen are considered. It is assumed that carbon nanomaterials (CNMs), namely nitrogen-doped carbon nanotubes (N-CNTs), can have a significant impact on the rate of thermal decomposition, electrical conductivity and catalytic properties of new materials.

Метод допирования позволяет изменить свойства углеродных нанотрубок (УНТ). Данный метод позволяет получить химически модифицированные углеродные наноматериалы (УНМ). При использовании легирующих элементов (допантов) любая химическая модификация будет оказывать большое влияние на характеристики УНТ. Путем выбора типа примеси можно управлять электронными свойствами. Такую модификацию называют «допированием» [1]. При этом, химическое присоединение функциональных групп к УНТ изменяет характер взаимодействия с окружающей средой. В УНМ азот находится в пиридиноподобном, пиррольном и графитоподобном (трехкоординированном) состояниях. Вследствие структурных особенностей наиболее доступным центром в углеродных нановолокнах допированных азотом (N-УНВ) является пиридиноподобный азот, а в углеродных нанотрубках допированных азотом (N-УНТ) в равной мере доступны все формы азота. По этой причине N-УНТ представляет большой интерес для применения в качестве носителя катализатора [2].

Азот способен встраиваться в различные структурные позиции графенового слоя (рис. 1) и соответственно, иметь различную энергию связи. Азот с энергией связи N 1s относят к графитоподобному типу «N<sub>Q</sub>», пиридиноподобному типу «N<sub>P<sub>γ</sub></sub>», пиррольному типу «N<sub>P<sub>γ</sub>T</sub>» и окисленному «N<sub>Ox</sub>» [3].

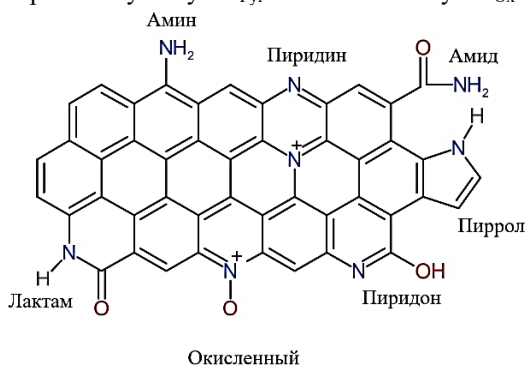


Рис. 1. Типы азотных центров в N-УНМ [3]

Благодаря близости величин атомных радиусов азот (N) является широко используемым допантом в сравнении с другими элементами, такими как фосфор (P), сера (S), и кремний (Si), с большим несоответствием размеров. Вместо гетероатомного замещения на стенке УНТ могут возникать значительные изменения исходной трубчатой структуры, поскольку допирование азотом приводит к «бамбукоподобным» [2] структурам.

## Список литературы

- Glerup M., Krstić V., Ewels C., Holzinger M., Lier G. Van Doping of Carbon Nanotubes - New York, 2008. - P. 169–242.
- Субоч А.Н., Кибис Л.С., Стонкус О.А., и др. Синтез и исследование многостенных углеродных нанотрубок, допированных азотом // Химия в интересах устойчивого развития. - Publishing House SB RAS, 2017. - Is. 1. - P. 85–21
- Arrigo R., Hävecker M., Schlögl R., Su D.S. Dynamic surface rearrangement and thermal stability of nitrogen functional groups on carbon nanotubes // Chemical Communications. - 2008. - Vol. 40. - P. 4891–4893.

М. ТАСКЫН, С.Х. АКНАЗАРОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПРОТИВОМИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ФЕНОЛЬНО-КРЕЗОЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Рассмотрены получение и применение противомикробного препарата на основе фенол-крезольных соединений, полученных высокотемпературным синтезом из рисовой шелухи, а также влияние полученного продукта на развитие науки и технологий, а также ожидаемое социальное и экономическое влияние.

M. TASKYN, S.KH. AKNAZAROV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF ANTIMICROBIALS BASED ON PHENOL-CRESOL COMPOUNDS FROM PLANT WASTE

The preparation and use of an antimicrobial drug based on phenol-cresol compounds obtained by high-temperature synthesis from rice husks, as well as the effect of the resulting product on the development of science and technology, as well as the expected social and economic impact, are considered.

Ежегодное мировое производство риса составляет 571 миллион тонн, из которых образуется примерно 140 миллионов тонн шелухи. Таким образом, результатом промышленной переработки риса являются большие объемы (до 20 % мас.) шелухи риса [1].

Полезная модель относится к способам получения комплекса жидкофазных продуктов пиролиза растительной клетчатки (деготь) шелухи риса, который может применен для производства фитокреолина. Креолин — сильное противомикробное и противопаразитарное средство. Обладает также вяжущим и противогнилостным свойствами.

Способ получения комплекса жидкофазных продуктов - дегтя в реакторе с последующей конденсацией целевого продукта, отличается тем, что в зону пиролиза подают острый пар с температурой от 300°C до 400°C и давлением 1,8-2,0 кгс/см<sup>2</sup>. По химическим показателям деготь из рисовой шелухи в составе имеет фенолы, крезол и фенольные кислоты, это обеспечивает инсектоакарицидные свойства. (таб.1, рис.1). Получены следующие результаты, которые приведены в таблице 1 и хроматограмме на рисунке 1.

Таблица 1. Содержание активных веществ в жидкофазных продуктах пиролиза

№	Наименование веществ	Содержание, мкл	Процентное содержание
1.	Фенол	897	0.7
2.	Крезол	856	0.5
3.	Фенольные кислоты	3406	4.1

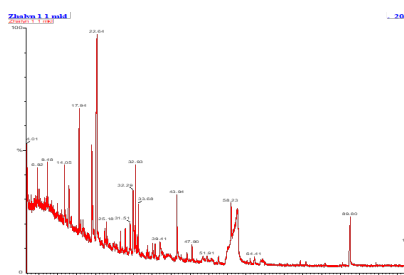


Рис. 1. Хроматограмма всех летучих веществ в жидкофазных продуктах пиролиза.

Использование рисовой шелухи позволяет решить проблему утилизации и снизить затраты на переработку отходов. Рисовая шелуха и ее зола непосредственно используются для производства и синтеза новых материалов. Она используется в качестве топлива, удобрения, субстрата, а также для получения активированного угля, пищевого волокна, кремнезема и кремниевых соединений, кирпича и т.д. Зола рисовой шелухи используется в металлургической, цементной и строительной промышленности. Легкая доступность и низкая цена рисовой шелухи в странах, производящих рис, является дополнительным преимуществом использования этого материала. Таким образом, обилие и возобновляемость рисовой шелухи представляет собой реальное преимущество перед ископаемым топливом для производства биоэтанола.

### Список литературы

1. Ghassan A.H. Study on properties of rice husk ash and its use as cement replacement material / A.H. Ghassan, B.M. Hilmi // Materials Research. – 2010. – V. 13. – № 2. – P. 185 – 190.

**Секция  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЕ И ЯДЕРНОЕ  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

Руководитель секции – Юрков Дмитрий Игоревич д.т.н.,  
зав. кафедрой 24

Секретарь секции – Масленников Сергей Павлович д.т.н.,  
профессор кафедры 24

Тел./факс: 8 (495) 788-56-99, доб. 9796  
E-mail: SPMaslennikov@mephi.ru

Е.П. БОГОЛЮБОВ, С.Э. ШОЛЕНИНОВ, Н.Н. ЩИТОВ

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА ГЕЛИЯ ПРИ РАБОТЕ ИСКРО-ДУГОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ ИМПУЛЬСНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Предельный ресурс импульсных нейтронных генераторов (ИНГ) на реакции  $T(d,n)^4\text{He}$ , определяется  $\beta$ -распадом трития с образованием  $^3\text{He}$  (гелий-3). Аномально большие ресурсы ИНГ-10К могут быть объяснены, в частности, откачкой радиогенного гелия при работе искро-дугового источника ионов вакуумной нейтронной трубки (ИИ ВНТ). Доклад посвящен результатам экспериментальной проверки данной гипотезы.

E.P. BOGOLUBOV, S.E. SHOLENINOV, N.N. SCHITOV

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

## RESEARCH OF HELIUM CAPTURE PROCESSES DURING OPERATIONS SPARK-ARC ION SOURCE OF PULSED NEUTRON GENERATORS

The limiting resource of pulsed neutron generators for the  $T(d,n)^4\text{He}$  reaction is determined by the  $\beta$ -decay of tritium with the formation of  $^3\text{He}$  (helium-3). The anomalously large resources of ING-10K generator can be explained, in particular, by the pumping out of radiogenic helium during the operation of the spark-arc ion source of the vacuum neutron tube. The report is devoted to the results of experimental testing of this hypothesis.

В 2011 году во ФГУП «ВНИИА» был разработан генератор нейтронов ИНГ-10К, предназначенный для работы на борту передвижной Марсианской научной лаборатории MSL-2009. Основной задачей аппаратуры являлось определение содержания воды и водородосодержащих соединений в приповерхностных слоях грунта Марса. Использован метод нейтрон-нейтронных физических исследований, применяемый при геофизических исследованиях нефтегазовых месторождений, и который впервые применен на практике в рамках космических экспериментов [1,2]. В результате проведения космических экспериментов летный образец генератора ИНГ-10К сделал более  $1,5 \cdot 10^7$  импульсов, выход нейтронов снизился с  $1,0 \cdot 10^7$  нейтр./имп. в начале ресурса до  $4,1 \cdot 10^5$  нейтр./имп. и остался работоспособным. Известно, что содержащийся в мишени вакуумной нейтронной трубки (ВНТ) тритий распадается с образованием  $^3\text{He}$  с периодом полураспада 12,32 года, так что постоянная  $\lambda$  порядка  $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$ . Начальное количество трития в мишени, соответствующее активности 2 Ки, составляло  $4 \cdot 10^{18}$  атомов. За прошедшие годы его содержание уменьшилось примерно вдвое, так что осталось  $2 \cdot 10^{18}$  атомов. Если все эти атомы попали в объем трубки, то концентрация при объеме трубки порядка  $25 \text{ см}^3$  составит  $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Это соответствует давлению порядка 1 Торр. Даже если высвобождается только 1%  $^3\text{He}$  [3], то все равно это соответствует  $10^{-2}$  Торр, что очевидно недостаточно для обеспечения электропрочности. Известно, что гелий в виде нейтральных молекул  $^4\text{He}$  практически не откачивается внутренним геттерным насосом [4]. В то же время известно, что будучи ионизованным и ускоренным до энергий более/порядка 10 кэВ, гелий надежно имплантируется в металлические поверхности. При энергии 10 кэВ поглощается порядка 99% гелия [5]. Однако прямых экспериментов, подтверждающих возможность откачки  $^3\text{He}$  при работе ионных источников ВНТ, в литературе не обнаружено. Для исследования процесса захвата гелия электродами ионного источника была использована «Многофункциональная установка электровакуумной обработки EV-VT-450/600-250» с прецизионной системой газонапуска  $^4\text{He}$ , различными датчиками давления и масс-спектрометром, в которой была изменена вакуумная схема для возможности подачи  $^4\text{He}$  через мишенный узел ВНТ. В целях однозначной интерпретации результатов был разработан и изготовлен макет ВНТ, в котором  $^4\text{He}$  подавался через штуцер в мишенном узле, а откачка внутреннего объема макета ВНТ и анализ газов остаточной атмосферы – через штенгель ВНТ и наоборот. В серии экспериментов был подтвержден факт ионизации гелия и, в то же время, отсутствие его поглощения образующейся пленкой металла электродов ионного источника. Прямая проверка факта откачки гелия материалом мишени ВНТ будет осуществлена после разработки и создания специального макета ВНТ, свободного от тяжелых изотопов водорода, с возможностью насыщения активных поверхностей водородом и создания известного давления гелия в стандартном объеме. Предстоит так же заменить высоковольтный (до 10 кВ) ввод в подколпачное откачиваемое (до  $5 \cdot 10^{-3}$  Торр) пространство. Однозначное подтверждение самого факта откачки будет иметь не только научное, но и практическое значение применительно к различным типам содержащих тритий ВНТ.

### Список литературы

1. Litvak M.L., Mitrofanov I.G. et al. The Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) Experiment for // Astrobiology, No. 8 (3), 2008.
2. Mitrofanov I.G., Litvak M.L., Varenikov A.B. et al. // Space Science Reviews, No. 170, 2012. p. 559-582.
3. В.М. Гулько и др. Ионно-вакуумные приборы для генерации нейтронов в электронной технике.// Киев, Техника, 1988 г.
4. Сакаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. // М.: Энергоатомиздат, 1988. - 280 с.
5. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. II. Распыление сплавов и соединений, распыление под действием электронов и нейтронов, рельеф поверхности: Пер. с англ. под ред. Р. Бериша. // М.: Мир, 1986. - 488 с.

## ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ КОРОТКОДУГОВЫХ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП СВЕРХВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрены вопросы конструирования многоэлектродных короткодуговых импульсных ламп, заполненных ксеноном при давлении 6 -10 атм. Представлены результаты расчетов толщины стенки кварцевой и сапфировой оболочек в условиях воздействия внутреннего давления, ударных волн, градиентов температуры. Выполнена оценка безопасных напряжений в соединениях электродного узла с оболочкой и описана унифицированная технология спая кварцевого стекла и сапфира с коваром.

S.V. GAVRISH, A.O. POTAPENKO, S.V. PUCHNINA, R.M. USHAKOV, P.A. CHILIKINA  
*Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd, Moscow, Russia*

## FUNDAMENTALS OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY OF MULTIELECTRODE ULTRA-HIGH PRESSURE SHORT-ARC GAS DISCHARGE LAMPS

There are considered the issues of multielectrode short-arc pulse lamps design, filled with xenon at pressure of 6-10 atm. The calculation results of the quartz and sapphire shell wall thickness under the influence of internal pressure, shock waves and temperature gradients are presented. There is evaluated the range of safe voltages in the joints of electrode node with the shell, as well as unified technology of soldering quartz glass and sapphire with kovar is described.

В середине прошлого века были достигнуты значительные успехи в конструировании импульсных многоэлектродных ксеноновых источников света со стеклянной оболочкой [1], предназначенных для стробоскопии, светотехники, эндоскопии и т.д. В настоящее время в указанных областях газоразрядные лампы успешно заменили светодиоды. Однако развитие оптоэлектронных систем УФ обеззараживания ставит задачу возврата к указанным техническим решениям, которые позволяют за счет сверхвысокого давления (СВД) ксенона 6-10 атм. достичь значений яркостных температур  $T_j$  более 10000К. При таких  $T_j$  спектр импульсного ксенонового разряда приближается к излучению абсолютно черного тела и позволяет в области длин волн 200 – 300 нм достичь КПД более 10%.

В качестве перспективных материалов оболочек (колб) импульсных ксеноновых ламп рассматриваются кварцевое стекло и профилированный сапфир (корунд) В данном разделе выполнен анализ основных факторов, воздействующих на колбу, определены продольные температурные профили некоторых серийных импульсных ламп. Рассмотрена методика расчета и выполнены вычисления напряжений в стенке разрядной оболочки, возникающих за счет давления нагретого рабочего газа, ударной волны, продольного и радиального градиентов температуры колбы и т.д. Отдельно рассмотрены термоупругие напряжения в спаях сапфира с коваром, появляющиеся при работе ксеноновой лампы СВД. Описаны основные конструктивные решения многоэлектродных импульсных ксеноновых ламп с сапфировой и кварцевой оболочками. На рисунке 1 приведены некоторые примеры конструктивных вариантов размещения в разрядном объеме основных электродов и электрода зажигания.



Рис. 1. Разработанные варианты конструкции многоэлектродных ламп с кварцевой оболочкой

Предлагается разработанный авторами метод унифицированной активной пайки кварцевого стекла и сапфира с коваром, суть которого заключается в нанесении магнетронным напылением многослойного металлизированного покрытия с последующим образованием различного рода соединений при расплавлении припоя. В работе рассматриваются особенности происходящих процессов при индукционной пайке металлизированного кварцевого стекла легкоплавкими припоями, представлены результаты оценки растекаемости различных металлов по поверхности кварца, проанализированы шлифы полученных соединений. Описан механизм взаимодействия многослойного металлического покрытия с сапфиром и медным припоем при высокотемпературном нагреве в вакууме.

Предложена температурно-временная диаграмма, подробно описывающая процесс образования спая и проанализированы дифрактограммы образовавшихся переходных слоев. В работе широко представлены газоразрядные лампы, изготовленные по разработанной технологии, и выполнены сравнительные оценки с существующими серийными способами формирования герметичных соединений кварцевого стекла и сапфира с металлами.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № 20ГРЭ-С18/91616).

### Список литературы

1. Маршак И.С. и др. Импульсные источники света. 2-е изд., пер. и доп. – М.: Энергия, 1978. – 472 с.



## КАРОТАЖНЫЕ ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ТРУБКИ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ

Работа посвящена изучению и реализации направлений повышения рабочих характеристик таких электровакуумных приборов как газонаполненные нейтронные трубки, которые используются для каротажа нефтегазовых скважин, в прикладных задачах, связанных с элементным анализом, а также в исследовательских целях.

I.A. KANSHIN

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

## LOGGING GAS-FILLED NEUTRON TUBES WITH INCREASED SERVICE LIVE

The work is devoted to the study and implementation of ways to improve the performance of such electric vacuum devices as gas-filled neutron tubes, which are used for well-logging, in applied problems related to elemental analysis, as well as for research purposes.

На сегодняшний день актуальной является задача повышения ресурса каротажных газонаполненных нейтронных трубок (ГНТ), эксплуатация которых происходит в условиях повышенной температуры окружающей среды в течение нескольких сотен часов. В таких условиях работы основными параметрами, влияющими на ресурс каротажных ГНТ, является электропрочность и стабильность нейтронного потока, которые имеют тенденцию к снижению в ходе эксплуатации ГНТ. В связи с чем предложены новые для ГНТ научно-технологические и научно-конструкторские решения повышения ресурса. Научно-технологическое решение заключается в добавлении к существующей технологии подготовки изолятора и электродов ионно-оптической системы (ИОС) перед монтажом в изделие ионно-плазменной обработки (рис. 1б), что позволило повысить электропрочность каротажных ГНТ [1]. Научно-конструкторское решение состоит в разработке новой конструкции ГНТ, которая имеет повышенную электропрочность и в которой стабилен нейтронный поток. Для обоснования принятых решений были выполнены расчеты и экспериментальные исследования (рис. 1а), из результатов которых установлено, что дополнение ионно-плазменной обработки к существующей технологии подготовки изолятора и электродов ИОС ГНТ позволяет эффективно обезгаживать поверхности указанных деталей, а в измененной конструкции ИОС ГНТ обеспечивается эффективная экранировка изолятора от запыления, подавляются пики локальной напряженности поля, а величина ионного тока на нейтрон-образующей мишени ГНТ обеспечивает стабильную генерацию нейтронного потока. Экспериментально было показано, что применение оригинальных научно-конструкторских и научно-технологических решений позволяет повысить ресурс каротажных ГНТ не менее, чем в 2 раза.

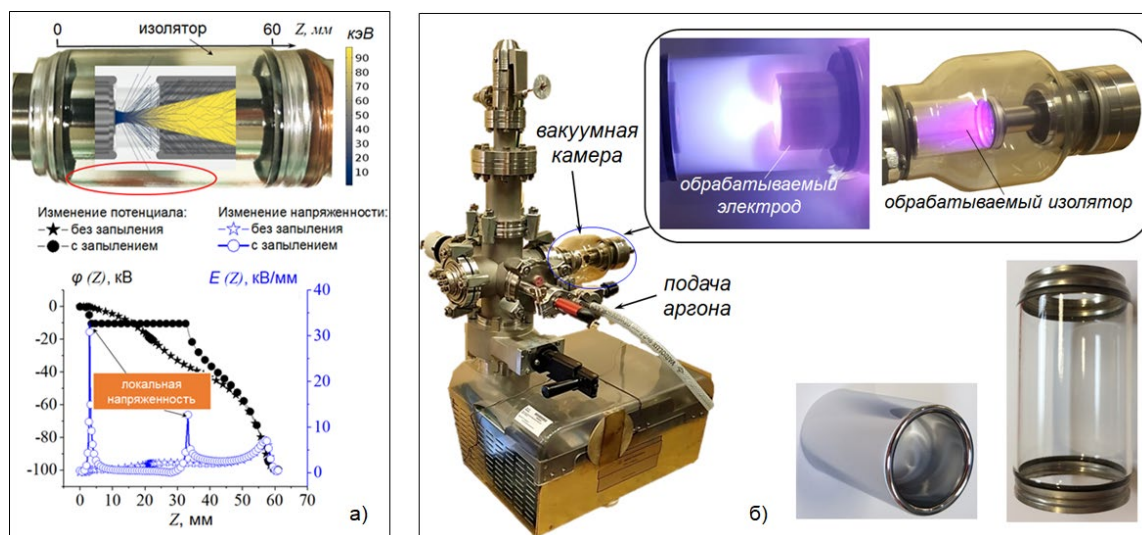


Рис. 1. Расчетные траектории ионного пучка и распределение потенциала и модуля напряженности поля вблизи внутренней поверхности изолятора в отсутствии и наличии на ней напыления (а); ионно-плазменная обработка изолятора и электродов ИОС (б)

### Список литературы

1. Каньшин И.А. // Materials. Technologies. Design. 2023, Т. 5 № 2 (12), С. 26-38. DOI 10.54708/26587572\_2023\_521226.

А.Ф. КОВАЛЕНКО

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия

## РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

В рамках квазистатической и динамической несвязанных задач термоупругости рассмотрено воздействие лазерного излучения на неметаллические пластины. Получены критерии термостойкости пластин и предложены пути обеспечения неразрушающих режимов отжига, если критерии не выполняются.

A.F. KOVALENKO

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia

## EXPANDING THE CAPABILITIES OF PULSED LASER ANNEALING NON-METALLIC PLATES

The effect of laser radiation on nonmetallic plates is considered within the framework of quasi-static and dynamic unrelated thermoelasticity problems. Criteria for thermal resistance of plates are obtained and ways to ensure non-destructive annealing modes are proposed if the criteria are not met.

Лазерный отжиг диэлектрических и полупроводниковых пластин после ионной имплантации позволяет улучшить нарушенную структуру и изменить концентрацию имплантата по толщине пластины. В ряде работ [1, 2] в рамках квазистатической и динамической несвязанных задач термоупругости получены критерии термостойкости неметаллических пластин при воздействии импульсного лазерного излучения. Критерии представляют собой аналитические соотношения, связывающие отношение предела прочности материала пластины к максимально возможным термоупругим напряжениям в ней и функции безразмерных параметров, характеризующих лазерное воздействие и свойства материала пластины. Для каждого режима воздействия получена своя функция. Например, в рамках квазистатической задачи термоупругости, характерной для лазерного воздействия миллисекундной длительности, указанное отношение сравнивается с функцией от критерия Бугера и условий накрытия пластины излучением. В рамках динамической задачи термоупругости, характерной для лазерного воздействия наносекундной длительности, указанная функция будет зависеть от длительности лазерного импульса, показателя поглощения материала пластины на длине волны лазерного излучения, скорости звука в материале и временной формы лазерного импульса [2]. Установлено, что лазерные импульсы с крутым фронтом и затяжным спадом являются более предпочтительными в процессе лазерного отжига, так как вызывают меньшие термоупругие напряжения.

Лазерный отжиг возможен, если выполняется критерий термостойкости пластины. В противном случае пластина будет разрушена термоупругими напряжениями в процессе отжига. Однако вследствие ограниченного выбора лазеров с требуемыми длинами волн, обеспечивающими неразрушающие режимы отжига, для некоторых материалов не всегда удается реализовать такой режим. В этом случае из критерия термостойкости необходимо определить минимально необходимую температуру, до которой необходимо предварительно нагреть пластину по всему ее объему для обеспечения выполнения критерия термостойкости. Как правило, предварительный нагрев пластины осуществляют в муфельной печи с обеспечением времени выдержки в два-три раза превышающем критерий Фурье для пластины заданной толщины. Для ряда материалов для обеспечения выполнения критерия термостойкости достаточно нагреть пластину на несколько десятков градусов.

Наибольшую неопределенность в детерминированную модель термостойкости вносит разброс предела прочности материала обрабатываемой пластины. Если предел прочности можно описать нормальным законом распределения случайной величины, то критерии можно использовать для определения значений параметров лазерного излучения, обеспечивающих сохранение целостности обрабатываемой пластины с заданной вероятностью.

### Список литературы

1. Коваленко А.Ф. // Стекло и керамика. 2016. № 6, С. 31 – 35.
2. Коваленко А.Ф. // Стекло и керамика. 2018. № 6, С. 37 – 42.

В.А. КУГАВДА, Е.В. РЯБЕВА, А.П. ДЕНИСЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **СТЕНД ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ 2D ТЕПЛОВЫХ КАРТ ИМПУЛЬСОВ ОТ НЕЙТРОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ**

В работе представлены основные технические решения разработки стенда для локализации источников нейтронов и электронов путем построения 2D тепловых карт. Основной частью стенда является детектор на основе сцинтиллятора ZnS/<sup>6</sup>LiF. Регистрация импульсов от частиц осуществляется счетчиком импульсов на основе микроконтроллера Piranha ESP32. Экспериментальный макет стенда собран и протестирован, определена максимальная загрузка микроконтроллера, построены тепловые карты нейтронных и электронных импульсов.

V. A. KUGAVDA, E. V. RYABEVA, A. P. DENISENKO

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **SETUP FOR BUILDING 2D THERMAL MAPS OF PULSES FROM NEUTRONS AND ELECTRONS**

The paper presents the main technical solutions for the development of a stand for the localization of neutron and electric sources by constructing 2D thermal maps. The main part of the stand is a detector based on the ZnS/<sup>6</sup>LiF scintillator. Pulse register from particles is performed by pulse counter based on Piranha ESP32 microcontroller. The experimental layout of the stand was assembled and tested, the maximum load of the micro-controller was determined, thermal maps of neutron and electronic pulses were built.

Локализация источника излучения имеет важное значение при работе с нейтронным излучением. В данном докладе представлены результаты визуализации импульсов от нейтронов и электронов, измеренных предложенным стендом.

В состав стенда входят регистрирующий элемент, счетчик импульсов, ПК и источник питания. Регистрирующий элемент представляет собой сборку размерами 0,7x0,7x10 см из сцинтиллятора ZnS/<sup>6</sup>LiF, светопровода, кремниевых фотоумножителей. Регистрация нейтронов осуществляется сцинтиллятором ZnS/<sup>6</sup>LiF: нейтрон взаимодействует с ядром <sup>6</sup>Li в грануле <sup>6</sup>LiF, а результатом их взаимодействия являются дочерние продукты –  $\alpha$ -частица и тритон – которые вызывают сцинтилляции оптического спектра в гранулах ZnS. Оптические фотоны регистрируются кремниевыми фотоумножителями SiPM MicroFC-60035-SMT, сигналы с которых поступают на усилитель-формирователь и счетчик импульсов на основе Piranha ESP32. Каждый сцинтиллятор просматривается двумя фотоумножителями, при этом пороги регистрации выставлены так, что один из них регистрирует только нейтроны, а второй – нейтроны и электроны.

Нейтронное излучение, как правило, сопровождается  $\gamma$ -излучением.  $\gamma$ -Кванты, как и нейтроны, регистрируются за счет вторичного излучения – электронов, которые образуются при взаимодействии  $\gamma$ -квантов с веществом сцинтиллятора. Экспериментально зарегистрировать импульсы от  $\gamma$ -излучения с активностью 100 кБк не удалось. Поэтому в дальнейшей работе для увеличения числа зарегистрированных импульсов использовался источник электронного излучения <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y.

До проведения экспериментов была определена максимальная загрузка микроконтроллера Piranha ESP32, которая составила 400 кГц.

В ходе работы было определено, что максимальная скорость счета импульсов от имеющегося источника электронного излучения намного меньше, чем погрешность счета импульсов от источника нейтронного излучения, что означает невозможность одновременного разделения импульсов от электронов и нейтронов. Поэтому в работе рассмотрена возможность построения 2D тепловых карт либо от источника электронного излучения, либо от нейтронного излучения.

Горизонтальное позиционирование детектора осуществлялось с шагом 7 мм для электронного излучения и 5 см для нейтронного излучения. Вертикальное позиционирование детектора относительно источника излучения – 7 мм для электронного излучения и 5 см для нейтронного излучения.

Максимальная абсолютная эффективность регистрации стенда (отношение зарегистрированных импульсов к числу испущенных частиц источником излучения) нейтронного излучения –  $8 \cdot 10^{-4}\%$  и электронного излучения –  $3,3 \cdot 10^{-4}\%$ .

Данный стенд имеет возможность регистрации импульсов как от электронного излучения <sup>90</sup>Sr-<sup>90</sup>Y с активностью  $10^4$  Бк на расстоянии до 35 мм, так и от нейтронного излучения <sup>238</sup>PuBe с потоком  $10^6$  н/с, замедленного в полиэтиленовой бочке с толщиной стенок 12 см, на расстоянии 100 см и более.

В ходе работы были построены 2D тепловые карты импульсов нейтронов и электронов. Данный стенд может применяться как позиционно-чувствительный детектор для построения 2D тепловых карт импульсов от нейтронов или электронов.

Е.И. КУДРЯВЦЕВ, А.В. ЛАЗУКИН  
*Национальный исследовательский институт «МЭИ», Москва, Россия*

## **КОМПАКТНЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК**

Рассмотрены схемы компактных высоковольтных источников питания на базе применения IGBT для технологических плазменных установок. Будет проведено моделирование схем с учётом влияния средств измерения, сравнение по максимальной частоте повторения импульсов и энергоэффективности.

E.I. KUDRYAVTSEV, A.V. LAZUKIN  
*National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute), Moscow, Russia*

## **COMPACT HIGH-VOLTAGE POWER SUPPLIES FOR TECHNOLOGICAL PLASMA INSTALLATIONS**

The circuits of compact high-voltage power supplies based on the IGBT for technological plasma installations are considered. Modeling of circuits will be carried out taking into account the influence of measuring elements, comparison by maximum pulse repetition frequency and energy efficiency.

Высоковольтные источники питания являются неотъемлемой частью любой установки, используемой для создания плазмы и её последующего исследования. Компактные высоковольтные источники импульсов различной формы используются для систем газонапуска, предварительной ионизации, подготовки электродов травлением. В настоящее время предлагаются различные концепции таких источников. Рассмотрены четыре схемы [1]-[4]:

В первой схеме [1] напряжение подаётся IGBT, после получения управляющих сигналов последовательно соединённые IGBT замыкают цепь на нагрузку. После разрядки, IGBT размыкают цепь, и замыкают её IGBT, подключённые к точке нулевого потенциала, для снятия оставшегося на нагрузке напряжения.

Вторая [2] конструкция представляет собой генератор Маркса с использованием индуктивных элементов. Напряжение источника создаёт противоположно направленные магнитные потоки в катушках, уменьшая их реактивное сопротивление в фазе зарядки. В фазе разрядки цепь с помощью IGBT замыкается таким образом, что в катушках возникают сонаправленные магнитные потоки, увеличивающие реактивное сопротивление.

Третья схема [3] является генератором Маркса с использованием полупроводниковых элементов. Отличием является использование IGBT вместо резисторов, что позволяет менять значение сопротивления в широком диапазоне. Также после фазы разрядки IGBT замыкаются таким образом, что остаточный заряд нагрузки используется для повторной зарядки конденсаторов.

Четвёртая схема [4] представляет собой генератор Маркса с использованием зарядной катушки. При замыкании цепи входное напряжение подаётся на зарядную катушку и запасается в энергии магнитного поля. После размыкания IGBT энергия магнитного поля преобразуется в энергию электрического поля в конденсаторе. Повторением этого цикла достигается значение напряжения на конденсаторе, при котором происходит замыкание на нагрузку.

Первая концепция является наименее энергоэффективной за счет фазы снятия напряжения. Однако схема позволяет реализовать частотный режим работы с частотами до десятков кГц. Остальные схемы чувствительны к частоте повторения импульсов. Наиболее энергоэффективной, является третья схема. Будет проведено сравнение режимов работы источников на различную нагрузку, в том числе разрядную.

### *Список литературы*

1. Мошкунов С.И. Разработка, создание и исследование генераторов высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Дисс. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук. С. ИЭЭ РАН, 2011, 166 с
2. Achour Y., Starzyński J., Jakubiuk K. // *Energies* 2022, 15, 4823
3. Zhu, B.; Su, H.; Fang, Z. // *Energies* 2023, 16, 2741.
- 4 Achour Y., Starzyński J., Łasica A. // *Bulletin of the polish academy of sciences technical sciences*, vol. 68, no. 2, 2020

А.А. КУЛИКОВ<sup>1</sup>, А.О. МОРОЗОВ<sup>1</sup>, А.В. ПРОКОПЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «НПП «Магратеп», Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА МОДУЛЬНОЙ МИКРОВОЛНОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ СПЕКАНИЯ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проведен обзор работ, показывающий возможности эффективного использования микроволновой электромагнитной энергии в процессах высокотемпературного спекания порошковых материалов. Разработан проект установки для эффективной обработки керамических материалов с вертикально расположенным продуктопроводом. В основу проекта заложен модульный принцип размещения антенных облучателей на многогранных поверхностях модуля. Представлены результаты электродинамических характеристик отдельных элементов модульной микроволновой установки.

A.A. KULIKOV<sup>1</sup>, A.O. MOROZOV<sup>1</sup>, A.V. PROKOPENKO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock Company 'NPP 'Magratep', Fryazino, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF MODULAR MICROWAVE INSTALLATION FOR SINTERING POWDER MATERIALS

The review of works showing the possibilities of microwave electromagnetic energy effective use in the processes of high-temperature sintering powder materials. The installation design for efficient processing of ceramic materials with vertically positioned product pipeline has been developed. The project is based on the modular principle of placing irradiator antennas on the multifaceted surfaces of the module. The electrodynamic characteristics of individual elements of the modular microwave installation are presented.

В последнее время в России и зарубежом активизировались работы по высокотемпературному нагреву различных порошковых материалов, как диэлектриков, так и полупроводников. Цели этих научных работ достаточно разнообразны: обезвоживание и интенсификация процессов нагрева порошковых материалов, а также их высокотемпературное спекание порошковых материалов. Например, в работе [1] рассматривался способ получения смешанных порошков диоксидов актинидов термической восстановительной денитрацией с использованием СВЧ излучения. Для данных исследований использовалась двух магнетронная установка печного типа, на которой невозможно организовать промышленное получение керамических порошков. Разработкой установки просыпного типа для высокотемпературного СВЧ нагрева керамического порошка занимается и зарубежная компания Linn High Temp GmbH. Производители силикатных керамических порошков в России указывают на наличие потребности в создании эффективных промышленных установок по высокотемпературному СВЧ спеканию порошковых материалов с производительностью более 100 кг/час на выходе из установки.

В работе рассмотрен вариант создания модульной микроволновой установки по высокотемпературному СВЧ спеканию порошковых материалов до температур 1200 °С. Большинство керамических порошков имеют низкую восприимчивость к СВЧ нагреву при низких температурах. Поэтому СВЧ-энергию планировалось использовать для догрева этих порошков с температуры больше 600 °С. Выполнена тепловая оценка процесса микроволнового нагрева. Модульный принцип положен в основу проектирования установки значительно упростит её конструирование и расчет [2]. Предложен вариант установки просыпного типа с горизонтально расположенным продуктопроводом из кварцевой трубы внешним диаметром 120 мм. Вокруг трубы размещается равносторонняя шестигранная рабочая камера на гранях которой устанавливаются источники СВЧ излучения. В качестве источников СВЧ излучения использовался разработанный сумматор складывающей мощность 4х магнетронов на частоте 2,46 ГГц в общую мощность 3,2 кВт. Каждый модуль установки содержит 3 сумматора СВЧ-мощности. Опытную установку с общей мощностью 28,8 кВт предполагается собрать из трех стандартных модулей.

С учетом минимизации воздействия одного сумматора на другой выполнен расчет стандартного модуля установки и разработана его конструкция. Используя пакет прикладных программ CST Studio, выполнен расчет волноводного дросселя для уменьшения выхода СВЧ-энергии из работающей камеры на 20 дБ. Так же разработана водяная нагрузка на узел вывода продукта с коэффициентом затухания СВЧ энергии не менее 30 дБ. Выполнено моделирование антенны сумматора работающего на свободное пространство. Проведено измерение характеристик антенны сумматора и исследованы степень взаимодействия между магнетронными генераторами. Исследованы электродинамические характеристики одного модуля микроволновой установки без нагрузки кварцевой трубой и керамическим порошком. Таким образом, создание микроволновой установки для эффективного догрева керамического порошкового материала является выполнимой задачей.

### Список литературы

1. Kulyako Y.M., Trofimov T.I., Pilyushenko K.S. et al. // Phys. Atom. Nuclei., 2020. Vol. 83. p. 1396–1399.
2. Morozov A.O., Prokopenko A.V. // Int. Conf. on Actual Prob. of Electron Dev. Eng., APEDE-2022, 2022. p. 221–222.

## КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ОТКАЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Рассмотрены недостатки и сложности эксплуатации существующих немеханических высоковакуумных откачных систем. Предложен способ откачки газовой среды с помощью электронного пучка. Описан принцип работы и основные элементы различных вариантов исполнения устройства, реализующего рассмотренный способ.

E.A. KUNIN, S.V. SERUSHKIN

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

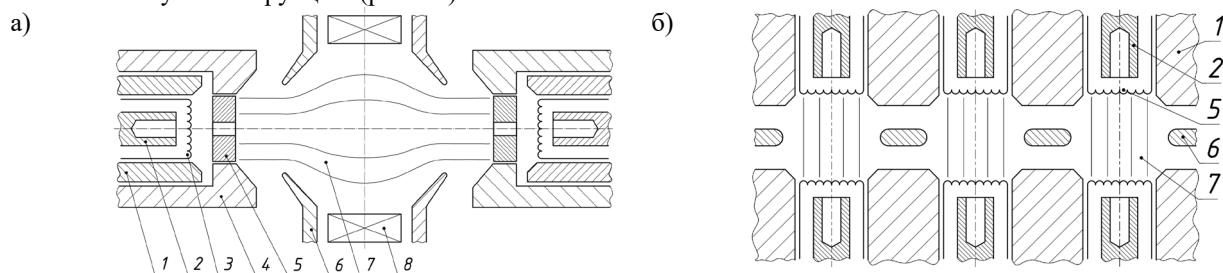
## THE CONCEPT OF ELECTROPHYSICAL HIGH-VACUUM PUMPING SYSTEM BASED ON ELECTRON BEAM TECHNOLOGY

The disadvantages and complications of operating existing non-mechanical high-vacuum pumping systems are considered. A method of vacuumizing a gaseous medium applying an electron beam has been proposed. The principle of operation and the major elements of various versions of the device that implements the considered method are described.

Современный уровень техники имеет узкую номенклатуру высоковакуумных немеханических откачных систем, к которым относятся сорбционные, криогенные и ионно-геттерные насосы. Перечисленные устройства имеют множество эксплуатационных недостатков, таких как ограниченное предельное остаточное давление, высокая степень селективности откачки, сложность откачивания легких и инертных газов, необходимость периодической регенерации, конечная емкость, зависимость от эксплуатационных условий и т.д. [1].

В работе предложен альтернативный способ откачки газовой среды, исключая обозначенные проблемы. Прохождение электронного пучка через газовую среду сопровождается образованием многозарядных ионов, которые взаимодействуют с электрическим полем его собственного объемного заряда – попадают в потенциальную яму. Ее формирование обусловлено увеличением, по направлению к оси пучка, плотности электронов и электростатического потенциала, распределение которых в случае эллиптического поперечного сечения соответствует нормальному [2]. Таким образом, происходит накопление ионов в объеме электронного пучка, которые осциллируют около его оси и образуют тонкий «жгут». Далее, производится удаление ионов за пределы рабочей области в продольном направлении путем их вытягивания электрическим полем генератора пучка.

Основу конструкции электронно-лучевой откачной системы (рис. 1а) составляют два противоположных генератора пучка, каждый из которых включает в себя основной термокатод с системой косвенного накала, анод и ионный уловитель. Направленное движение электронов вспомогательного и основного пучка обеспечивается внешним и внутренним цилиндром Венельта. Допустима реализация устройства с прямонакальным основным термокатодом и общим анодом. Кроме того, возможно объединение в многоячеечную конструкцию (рис. 1б).



1 – внутренний цилиндр Венельта, 2 – ионный уловитель, 3 – косвенный накал, 4 – внешний цилиндр Венельта, 5 – основной термокатод, 6 – анод, 7 – электронный пучок, 8 – магнитная линза

Рис. 1. Электронно-лучевая откачная система: а) с одной парой термокатодов, б) многоячеечная

Принцип работы описанного устройства основан на поочередной подаче ускоряющей разности потенциалов на генераторы электронного пучка. Во время работы одного из них, термокатод второго разогревается под воздействием электронов до рабочих температур термоэмиссии, после чего первый генератор заземляется, а на второй подается ускоряющее напряжение и процесс повторяется. Такая организация работы устройства позволяет сохранить значительное количество энергии в системе и осуществлять вытягивание ионов в двух направлениях.

Рассмотренное устройство и принцип его работы позволяет производить откачку любых газов с малой степенью селективности и без ограничения на предельное остаточное давление.

### Список литературы

1. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
2. Шиллер З. Электронно-лучевая технология: Пер. с нем./ З. Шиллер, У. Гайзиг, З. Панцер.: Энергия, 1980. – 528с.

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Описана концепция метода управления установкой, в которой в качестве исполнительной части используется высоковольтный поверхностный разряд атмосферного давления. Метод основан на анализе статистических распределений характеристик отдельных токовых событий, протекающих в электродной системе. Представлены схема эксперимента и варианты представления статистических распределений. Ограничения метода связаны с разрешающей способностью системы сбора данных и паразитными сигналами.

A.V. LAZUKIN, A.A. MAMONOV  
JCS «SSC RF TRINITI», Troitsk, Moscow, Russia

## METHOD OF CONTROLLING HIGH-VOLTAGE ATMOSPHERIC PRESSURE SURFACE DISCHARGE INSTALLATION

The concept of the installation control method is described, in which a high-voltage atmospheric pressure surface discharge is used as an executive part. The method is based on the analysis of statistical distributions of the characteristics of individual current events occurring in the electrode system. The scheme of the experiment and variants of the representation of statistical distributions are presented. The limitations of the method are related to the resolution of the data acquisition system and parasitic signals.

Поверхностный разряд – разновидность газового разряда, существующая вблизи электрода с малым радиусом кривизны около поверхности твердого диэлектрика. Этот вид разряда, за счет простоты и надежности электродных систем и источников питания, нашел широкое применение в электротехнологиях. При технологических обработках требуется воспроизводимость режима воздействия в течение всего времени эксплуатации устройства. Для контроля режима установок с поверхностным разрядом выбирают (в основном) напряжение на электродах, мощность разряда или одну из первичных выходных характеристик (выход озона, ионный ток). По выбранному параметру создается обратная связь. Однако, при длительной эксплуатации электродной системы возникают повреждения её основных элементов, которые вызывают изменение режима воздействия и, соответственно, искажают результаты обработки. В отдельных сложных технологиях, например, при обработке биологических объектов, режим воздействия по этим параметрам не удается описать в принципе.

Для реализации управления установкой поверхностного разряда в данной работе предлагается использовать метод основанный на контроле и интерпретации статистических распределений характеристик отдельных микроударов. Подобные методы используются для контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования, где источниками информации являются параметры отдельных частичных разрядов [1].

Накопление необходимого объема статистических данных проводилось на модельном экспериментальном стенде. Основу стенда составляла электродная система поверхностного разряда. На поверхность керамического диэлектрика толщиной 1 мм была нанесена тонкая медная фольга. На этот электрод прикладывалось высокое напряжение частоты 30 кГц относительно заземленного электрода, нанесенного на обратную сторону керамического диэлектрика. В заземленном электроде была высечена секция шириной 2 мм под зоной развития разряда. Эта секция заземлялась через шунт с сопротивлением 50 Ом. Напряжение измерялось емкостным делителем. Сбор данных осуществлялся осциллографом с частотой дискретизации 4 Гвыб/с и частотой пропускания 500 МГц. Собранные данные были размечены, систематизированы и размещены на платформе Science Data Bank [2].

Основными характеристиками, которые могут отражать особенности существования разряда, могут быть среднее число импульсов тока на полуволнах питающего напряжения, длительность существования разряда, перенесенный заряд, доля импульсов тока, переносающих заряд выше или ниже определенного порога, смещение начального напряжения зажигания. В дальнейшем предполагается провести отработку технологических режимов, например, при синтезе озона, ориентируясь на описание режима по этим характеристикам.

В ходе анализа накопленных данных были выявлены и недостатки выбранного подхода, связанные с полнотой (информативностью) собираемых данных о токовых событиях, регистрируемых на шунте. Шунт, введенный в цепь обратного электрода, регистрирует не только ток импульсов микроударов над 2 мм измерительной секцией, но и другие изменения зарядов на поверхности диэлектрика или в удалении от измерительной секции. Второе затруднение связано с тем, что наиболее производительных режимам, когда возникают токовые события значительных амплитуд, под порог разрешающей способности осциллографа попадает большое число токовых событий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 23-29-00265

*Список литературы*

1. Florkowski M. // Energies 2021, 14, 3886.
2. Lazukin A, Chernyshev T., Krivoruchko D. // Science Data Bank. 2023.  
<https://www.scidb.cn/en/detail?dataSetId=6e0a2ec2b24e40a6ac4415632070599d>

С.П. МАСЛЕННИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОСНОВЕ ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ МИШЕНЕЙ**

Представлены результаты исследований разрядных процессов и режимов формирования ионных потоков в системах инерциального электростатического удержания плазмы, применяемых в генераторах нейтронов на основе газоплазменных мишеней. Проведены измерения амплитудно-временных характеристик разряда и параметров нейтронных потоков в условиях импульсного приложения высокого напряжения и предварительной ионизации газа.

S.P. MASLENNIKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **A STUDY OF PULSE OPERATION REGIMES OF GAS-PLASMA TARGET NEUTRON GENERATORS**

The results of studies of discharge processes and formation regimes of ion flows in systems of inertial electrostatic confinement used in neutron generators based on gas-plasma targets are presented. The amplitude-time characteristics of the discharge and the parameters of neutron flows under conditions of pulsed high voltage supply and preionization of gas were measured.

Нейтронные генераторы, принцип работы которых основан на реакциях термоядерного синтеза, применяются при решении научно-исследовательских и технологических задач в ядерном и электрофизическом приборостроении, геофизике, ядерной медицине, системах безопасности и неразрушающего контроля, космических исследованиях. К отдельному классу нейтронных генераторов относятся системы инерционного электростатического удержания плазмы (ИЭУП) [1], в которых реакция синтеза проходит в газоплазменной мишени, формируемой из наполняющего разрядную камеру газа.

Импульсные системы ИЭУП обладают рядом преимуществ, обусловленных формированием сильноточных ионных потоков, которые не могут быть получены при использовании источников питания постоянного тока. Эти системы обладают большим ресурсом работы за счет сохранения реакционной способности газоплазменной мишени, которая воспроизводится при ионизации газа, заполняющего рабочую камеру. Практическая реализация импульсного режима работы генераторов с высоким выходом нейтронов связана с рядом физических ограничений и требует применения специальных схемотехнических и конструкторских решений [2].

В работе представлены результаты исследований режимов формирования импульсных разрядов и генерации нейтронов с энергией 2,5 МэВ в системе ИЭУП сферического типа в условиях импульсного питания с предварительной ионизацией газа. Эксперименты выполнены на экспериментальных стендах, в которых реализована комбинированная система питания разрядного узла, объединявшая в себе генераторы наносекундных импульсов [3] и источники питания постоянного тока. Приложенное к высоковольтному электроду разрядной камеры постоянное напряжение обеспечивало условия для зажигания фонового тлеющего разряда, из которого извлекались импульсные ионные потоки при подаче наносекундных импульсов ускоряющего напряжения.

Полученные результаты позволили изучить зависимости амплитудно-временных характеристик импульсных токов и напряжений от условий иницирования, параметров и полярности напряжения питания фонового тлеющего разряда. Экспериментально показано, что применение разнополярного питания предварительного и импульсного разрядов способствует увеличению амплитуды тока импульсного разряда и уменьшению времени задержки его зажигания. Амплитудно-временные характеристики импульсного разряда не изменялись в зависимости от частоты повторения импульсов высокого напряжения, подававшихся на электродную систему ИЭУП. Определяющее влияние на условия зажигания импульсного разряда и его амплитудно-временные характеристики оказывало давление газа, при увеличении которого фиксировался рост амплитуды тока импульсного разряда.

Условия для стабильного горения предварительного разряда в рабочей камере ИЭУП с внутренним диаметром 100 мм обеспечивались в диапазоне давления газа ( $D_2$ ) 40 – 120 мТорр при положительной полярности напряжения питания и токе разряда до 6 – 12 мА. В исследованных режимах работы камеры ИЭУП при частоте следования импульсов высокого напряжения 320 Гц, амплитуде тока импульсного разряда 30 А и вкладываемой в разряд мощности 600 Вт выход нейтронов с энергией 2,5 МэВ составил  $5 \cdot 10^6$  нейтр./с.

### *Список литературы*

1. Miley G.H. Inertial Electrostatic Confinement (IEC) Fusion. Fundamentals and Applications. // Springer Science, 2014, 400 p.
2. Прокуратов И.А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термояд. синтез. 2022, т.45, №1, с. 108–118.
3. Крастелев Е.Г., Масленников С.П. // ПТЭ. 2009, №5, с.98–101



В.Е. МЕЛЬНИКОВА, Г.В. ПАВЛИХИН, И.А. ХОЛОМОВ, Д.И. ЮРКОВ

*ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», Москва, Россия*

## **РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО НЕЙТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОТОКОМ $10^{10}$ Н/С ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ**

Рассмотрены требования к современным мощным генераторам для аналитических целей. Предложено техническое решение для реализации компактного генератора, включающее применение системы принудительного охлаждения мишенного узла, которая устанавливается внутрь блока излучения, не увеличивая существенно габариты изделия. Проведено математическое моделирование охлаждения мишени. Реализован образец генератора с установленной системой охлаждения, экспериментально подтверждена эффективность технического решения.

V.E. MELNIKOVA, G.V. PAVLIKHIN, I.A. KHOLOMOV, D.I. YURKOV

*FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA), Moscow, Russia*

## **DEVELOPMENT OF A COMPACT NEUTRON GENERATOR WITH FLUX $10^{10}$ N/S FOR ANALYTICAL PURPOSES**

The requirements for modern powerful generators for analytical purposes are considered. A technical solution has been proposed for the implementation of a compact generator, including the use of a forced cooling system for the target assembly, which is installed inside the radiation unit without significantly increasing the dimensions of the generator. Mathematical modeling of target cooling was carried out. A sample generator with an installed cooling system was implemented, and the effectiveness of the technical solution was experimentally confirmed.

Разработка компактного генератора нейтронов с высоким максимальным потоком ( $10^{10}$  н/с) проводится во ФГУП «ВНИИА» в связи с потребностью в мощных излучателях с большим ресурсом для элементного анализа в различных условиях: от лабораторий до поточных анализаторов на конвейерных производствах. На основании проведенного обзора существующих генераторов для аналитических целей к характеристикам разрабатываемого излучателя были выдвинуты следующие требования: максимальный поток нейтронов – не менее  $10^{10}$  нейтрон/с (D-T); ресурс – не менее 1000 часов; режим работы – импульсный; компактность ( $\sim 0,3 \times 0,5$  м). Существующие генераторы нейтронов для аналитических целей удовлетворяют только части выдвинутых требований к характеристикам,

Предложено техническое решение по компоновке генератора, выполненного по схеме с заземленным источником, обеспечивающее портативность излучателя (характерные размеры 262x447). Впервые предложен способ охлаждения мишени компактного нейтронного генератора для обеспечения его безостановочной работы, включающий установку внутрь блока контура принудительной циркуляции масла, без существенного увеличения габаритов излучателя. Проведено математическое моделирование нагрева элементов генератора в двух случаях: при установке внутрь блока излучения контура принудительной циркуляции и без установки такого контура. При принудительном охлаждении мишени, находящейся под напряжением 120 кВ, ее температура не приближается к критическому значению 300 °С и устанавливается на уровне 103 °С. В случае реализации генератора без контура принудительной циркуляции критическая температура мишени достигается через 35 минут эксплуатации. На основании результатов моделирования реализован компактный генератор нейтронов ИНГ-15 с максимальным потоком  $10^{10}$  н/с. Экспериментально подтверждены результаты расчетов: генератор включался на 6 часов с потоком  $1,8 \cdot 10^8$  н/с (включение генератора с D-D трубкой), деградация потока не наблюдалась, температура блока не приблизилась за время эксперимента к критическим значениям.

### *Список литературы*

1. Neutron generators for analytical purposes // IAEA Radiation Tech. Rep. Ser. No. 1. Int. Atomic En. Agency Vienna, 2012.

**Секция  
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ**

Руководитель секций – д.ф.-м.н., профессор Попруженко  
Сергей Васильевич

Секретарь секций – д.ф.-м.н., профессор Городничев  
Евгений Евгеньевич  
– к.ф.-м.н., доцент Воронова Нина  
Сергеевна

Тел./факс.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9377

E-mail: [gorodn@theor.mephi.ru](mailto:gorodn@theor.mephi.ru), [nsvoronova@mephi.ru](mailto:nsvoronova@mephi.ru)

П.Ф. КАРЦЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ШИРИНА И ФОРМА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ АННИГИЛЯЦИИ ПАРАПОЗИТРОНИЯ В СОСТОЯНИИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА**

Представлено исследование спектра гамма-импульса при аннигиляции атомов парапозитрония в состоянии неоднородного бозе-конденсата. Анализируется ширина и формы линии излучения в зависимости от плотности частиц. Приводятся результаты численного моделирования и качественные оценочные соотношения.

P.F. KARTSEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **WIDTH AND SHAPE OF ANNIHILATION RADIATION SPECTRAL LINE OF PARAPOSITRONIUM IN THE STATE OF BOSE EINSTEIN CONDENSATE**

The study of gamma-ray pulse spectrum during the annihilation of parapositronium atoms in the nonuniform state of Bose Einstein condensate is presented. The width and shape of the spectral line is analysed depending on the particle density. The results of numerical simulation and qualitative estimations are given.

Позитроний – водородоподобный атом, связанное состояние электрона с античастицей-позитроном [1]. Короткоживущее синглетное состояние  $1^3S_0$  (так называемый парапозитроний) преимущественно распадается на два гамма-кванта противоположных импульсов с энергией каждого 511 кэВ. Узкий спектр последних представляет интерес для создания мощного гамма-источника на этой частоте. Существует перспективная идея создания гамма-лазера на базе атомов позитрония в состоянии бозе-конденсата [2]. Для этого предлагается использовать достаточно мощный источник позитронов, которые при охлаждении в веществе связываются с электронами в атомы позитрония. Далее они могут быть захвачены в микропорах вещества [3] или образовывать пузырьки в жидком He [4]. Хотя короткоживущий синглетный позитроний почти сразу теряется, долгоживущий триплетный вариант имеет достаточно времени для охлаждения ниже температуры бозе-конденсации  $T_c$ , которая из-за малой массы частиц может составлять около 300 К при обсуждаемой в литературе плотности  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Далее предлагается радиочастотным импульсом перевести триплетные атомы в синглетные [2], что позволит получить большое число синглетных атомов в одном квантовом состоянии, которые далее при когерентной аннигиляции создадут мощный импульс гамма-квантов.

Ранее в работе [2] был рассмотрен процесс генерации гамма-излучения в однородном бозе-конденсате атомов парапозитрония и получены оценки для коэффициента усиления.

В данной работе исследуется спектр и форма импульса излучения при аннигиляции бозе-конденсата конечных размеров и неоднородной плотности. Анализ основных мод уравнений показывает, что они относятся к классу уравнений для математического маятника и в некоторых случаях сводятся к уравнению синус-Гордона. Численное моделирование демонстрирует генерацию гамма-импульсов сложной формы и различную эффективность преобразования в зависимости от концентрации атомов и размеров конденсата. Исследован временной профиль и спектральный состав генерируемого импульса.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект государственного задания No FSWU-2023-0031).

### *Список литературы*

1. Savely G. Karshenboim, Int. J. Mod. Phys. A19 (2004) 3879-3896.
2. H. K. Avetissian, A. K. Avetissian, and G. F. Mkrtchian, Phys. Rev. B **92**, 023820 (2015).
3. S. Mariazzi et al., Phys. Rev. B **81**, 235418 (2010).
4. John P. Hernandez and Sang-il Choi, Phys. Rev. **188**, 340 (1969).

## ДВУХФОТОННЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКОМ КОНДЕНСАТЕ ЭКСИТОНОВ И ПОЛЯРИТОНОВ ПО СХЕМЕ ХЕНБЕРИ БРАУНА И ТВИССА

Рассмотрено испускание двухфотонного сигнала двумерной конечной системой конденсированных прямых экситонов и поляритонов в оптической микрополости. Было получено выражение, связывающее интенсивность двухфотонного сигнала и долю конденсата в системе при конечной температуре. Рассчитаны корреляторы конденсированной системы с использованием гидродинамического подхода.

R.D. IVANOVSKIKH

N.L. Dukhov All-Russia Research Institute of Automatics (VNIA), Moscow, Russia

## TWO-PHOTON CORRELATIONS IN BOSE-EINSTEIN CONDENSATE OF EXCITONS AND POLARITONS IN HANBURY BROWN AND TWISS SETTING

Emission of two-photon signal by a finite two-dimensional system of condensed direct excitons and polaritons in a microcavity is considered. The expression linking intensity of two-photon signal and part of the condensate in the system at finite temperatures is obtained. Correlation functions of the condensed system are calculated via hydrodynamic approach.

На границе раздела двух полупроводников образуется квантовая яма, в которой существуют связанные состояния электронов и дырок - экситоны. Частицы, являющиеся линейной комбинацией экситона и фотона, называются поляритонами. Такая линейная комбинация образуется при помещении системы двумерных экситонов в оптическую микрополость. И экситоны, и поляритоны являются бозонами, поэтому теоретически они могут бозе-конденсироваться при температуре ниже критической. Экситоны намного легче атомов, а поляритоны намного легче экситонов из-за малой эффективной массы фотона в микрополости. Благодаря этому и экситоны, и поляритоны конденсируются при значительно более высоких температурах, чем атомы. Так, например, Бозе-конденсация разреженного газа атомов рубидия была продемонстрирована при температуре 200 нанокельвин, в то время как макроскопическая заселённость основного состояния в системе поляритонов была обнаружена при температуре 19К [1], однако долгое время получить Бозе-Эйнштейновский конденсат экситонов оставалось сложной задачей.

Для диагностики наличия и доли в системе конденсата Бозе-Эйнштейна используется ряд методов. Один из них - схема двухфотонных совпадений Хенбери-Брауна и Твисса. Метод состоит в измерении двухфотонного сигнала, испускаемого системой экситонов (поляритонов). Если в системе есть когерентная фаза, то в спектре излучения системы появляются парные корреляции фотонов [2].

Парная корреляционная функция фотонов отлична от единицы в том и только том случае, если отличен от нуля аномальный коррелятор  $iF(r, s, t) = \langle T[\psi(r, t)\psi(s, 0)] \rangle$ . Последний же отличен от нуля только при наличии в системе конденсата Бозе-Эйнштейна.

Для расчёта корреляторов системы, владеющей Бозе-конденсатом, применяется теоретический аппарат Боголюбова, однако он имеет ограниченную применимость, и в реалистичном для экситонов режиме корреляций боголюбовский расчёт обычно даёт малую или даже отрицательную долю конденсата  $n_0/n$ . Поэтому вместо стандартного метода Боголюбова применяется гидродинамический метод в квантовой теории поля для равновесной (или достаточно долгоживущей квазиравновесной) крупномасштабной когерентной фазы экситонов (поляритонов).

В результате теоретических расчётов в гидродинамическом подходе и численного моделирования была получена зависимость интенсивности двухфотонного сигнала от доли конденсата и от температуры, зависимость самой доли конденсата от температуры, а также угловое распределение двухфотонного сигнала для экситонной и поляритонной систем (рис. 1).

Работа выполнена под руководством Ю.Е. Лозовика и И.Л. Курбакова, Институт Спектроскопии РАН.

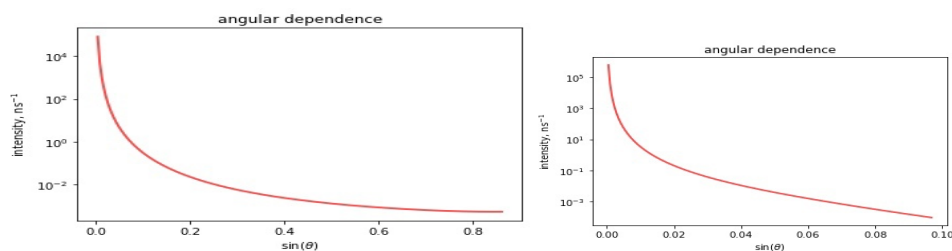


Рис. 1. Угловая зависимость двухфотонного сигнала в системе экситонов (слева) и поляритонов (справа).

### Список литературы

1. J. Kasprzak, M. Richard, S. Kundermann and others // Nature 2006. Vol. 443, P. 409–414.
2. А.В. Горбунов, В.Б. Тимофеев, Д.А. Демин, А.А. Дремин // Письма в ЖЭТФ 2009. Том 90, №2. 159-162.

К. Д. ДЯДЬКИН, Н. С. ВОРОНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО ПОЛЯРИТОННОГО БОЗЕ-КОНДЕНСАТА С БАРЬЕРОМ

Рассмотрена динамика поляритонного бозе-конденсата в кольцевой геометрии с дефектом, описываемая уравнением Гросса-Питаевского, и найдено основное состояние конденсата. Написан код на языке Python для моделирования динамики и реализован метод мнимого времени. Устойчивость протестирована на различных начальных условиях.

K. D. DYADKIN, N. S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## SIMULATION OF A RING-SHAPED POLARITON BOSE CONDENSATE WITH A BARRIER

Dynamics of a polariton Bose condensate on a ring with a potential defect was numerically simulated using the Gross-Pitaevskii equation and the ground state of the condensate is found. Python code for modeling the dynamics is developed and the imaginary time method is implemented. Stability was tested against various trial initial conditions.

Рассматривается динамика поляритонного конденсата в полупроводниковых структурах, состоящие из оптического микрорезонатора с погружёнными в него квантовыми ямами. Поляритонный бозе-конденсат в данной структуре возбуждается при помощи облучения монохроматическим излучением. Проекция волнового вектора фотона на ось  $z$  оказывается квантованной, из-за чего фотон становится эффективно двумерным и может войти в режим сильной связи с экситоном из квантовой ямы. В данной системе, с учетом лазерной накачки и конечности жизни квазичастиц, наступает динамическое равновесие. Основным уравнением для описания данной системы в предположении низких температур (при  $T \ll T_c$ , где  $T_c$  температура бозе-конденсации) является уравнение Гросса-Питаевского для волновой функции поляритонного бозе-конденсата  $\psi$ , где  $V$  — внешний потенциал, а  $\alpha_1$  — константа взаимодействия  $m^*$  — эффективная масса частиц:

$$i\hbar\partial_t\psi = \left(-\frac{\hbar^2\nabla^2}{2m^*} + V + \alpha_1|\psi|^2\right)\psi$$

в которое в общем случае могут быть добавлены слагаемые, связанные с накачкой и утечкой частиц.

Целью исследования являлось определение влияния геометрии барьера на собственные состояния и динамику поляритонного конденсата на кольце, а именно на распределение плотности и фазы конденсата.

Численный расчёт собственных состояний. Для численного моделирования уравнения (1) использовались метод Фурье и метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Для пространственного шага использовался шаг в импульсном пространстве с помощью метода Фурье, затем для шага по времени используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка. В результате получена динамика конденсата. Далее применялся метод мнимого времени для поиска основного состояния. Полученный результат показан на рисунке 1.

Была получена динамика поляритонного бозе конденсата и его нижнее состояние методом мнимого времени. Получены зависимости срезов плотности и фазы конденсата от высоты и ширины барьера.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект No. 24-22-00426, <https://rscf.ru/project/24-22-00426/>.

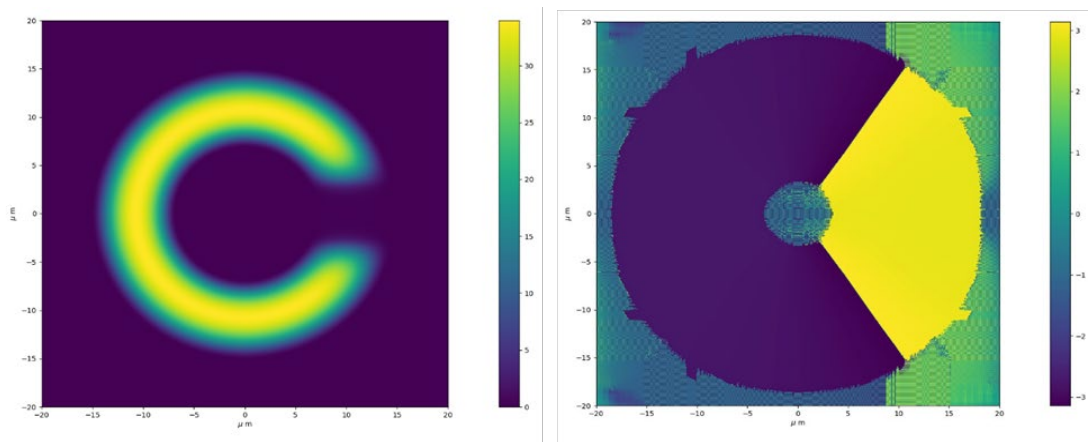


Рис. 1. Пространственный профиль плотности(слева) и фазы(справа) основном состоянии (единицы измерения  $\frac{1}{\mu\text{m}^2}$ ).

## ТУННЕЛИРОВАНИЕ, НЕЛИНЕЙНАЯ САМОЛОКАЛИЗАЦИЯ И БОЗОННЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА В КОЛЬЦЕВОМ ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОМ БОЗЕ-КОНДЕНСАТЕ

Изучается эффект Джозефсона в кольцевой геометрии с двумя контактами (барьерами) в системе экситонных поляритонов. Рассмотрен случай скалярного конденсата квазичастиц и продемонстрированы различные режимы осцилляций дисбаланса частиц и относительной фазы параметров порядка, описывающих конденсаты в двух полукольцах, разделенных барьерами, в зависимости от начальных условий. Изучено влияние спина квазичастиц на многообразии режимов осцилляций в системе.

V.A. MASLOVA, N.S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## TUNNELING, NONLINEAR SELF-TRAPPING, AND THE BOSONIC JOSEPHSON EFFECT IN A RING EXCITON-POLARITON BOSE CONDENSATE

The Josephson effect is studied for the ring geometry with two junctions (barriers) in a system of exciton-polaritons. The case of a scalar condensate is considered and various regimes of oscillations of particle imbalance and the relative phase of order parameters describing condensates in the two semi-rings separated by barriers are demonstrated, depending on initial conditions. The influence of quasiparticles spin on the implementation and variety of oscillations regimes in the system has also been studied.

Реализация бозе-эйнштейновской конденсации на базе фотонных полупроводниковых платформ открыла новые возможности для изучения квазиравновесного коллективного поведения частиц. Примером такой платформы являются экситонные поляритоны в микрорезонаторе. Одним из нетривиальных нелинейных эффектов, наблюдаемых в такой системе, является эффект Джозефсона (ЭД), который представляет собой класс явлений, связанных с взаимопревращениями различных популяций частиц конденсата (внутренний ЭД) или туннелированием частиц между двумя пространственно-разделенными конденсатами (внешний ЭД). Ранее этот эффект исследовался в геометрии с потенциалом в виде двойной потенциальной ямы [1]. Наша работа посвящена исследованию поведения поляритонного конденсата в кольцевой геометрии с барьерами (см. рис. 1(a)), которая накладывает периодические граничные условия на параметр порядка.

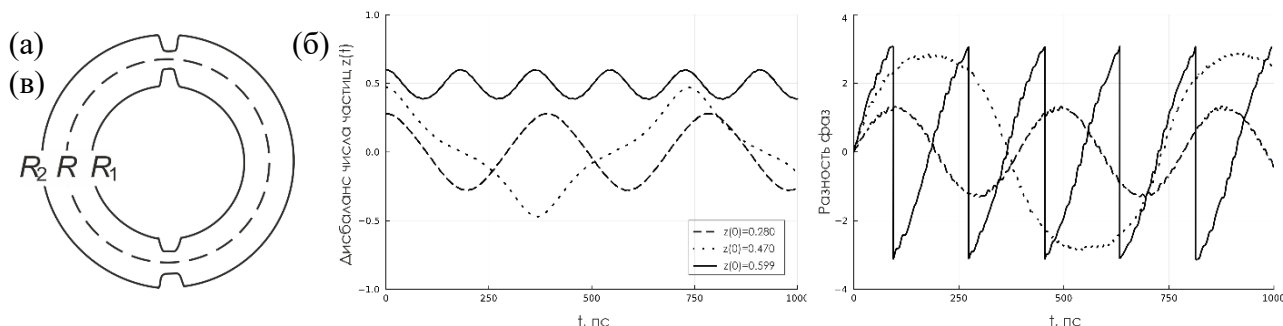


Рис.1. (а) Схема поляритонного кольца с двумя контактами и переход к одномерной задаче. (б,в) Зависимости от времени дисбаланса частиц (б) и относительной фазы (в) параметров порядка для различных начальных дисбалансов.

Исследованы осцилляции в скалярном конденсате поляритонов. На рис. 1(б,в) продемонстрированы различные режимы осцилляций дисбаланса частиц и относительной фазы параметра порядка между полукольцами, разделенными барьерами. При относительно небольшом дисбалансе частиц наблюдаются гармонические колебания как дисбаланса частиц, так и фазы. При увеличении начального дисбаланса наступает режим самолокализации, обусловленный взаимодействием, при этом фаза начинает бежать. Примечательно, что по сравнению с эффектом Джозефсона в двойной квантовой яме реализация нелинейных режимов, таких как макроскопическая самолокализация, наступает при гораздо меньших величинах плотности. Вторая часть работы посвящена изучению влияния псевдospина (поляризации) частиц на многообразии наблюдаемых режимов осцилляций. Помимо пространственного эффекта Джозефсона в такой системе имеет место внутренний ЭД, связанный с взаимопревращениями частиц с разными спинами друг в друга за счет ТЕ-ТМ расщепления поляритонных мод. Показано, что величина ТЕ-ТМ расщепления на кольце может оказаться достаточно большой.

Работа поддержана Российским научным фондом, проект No. 24-22-00426, <https://rscf.ru/project/24-22-00426/>.

### Список литературы

1. K. G. Lagoudakis et al., Phys. Rev. Lett. **105**, 120403 (2010).
2. M. Abbarchi et al., Nat. Phys. **9**, 275 (2013).

А.М. ГРУДИНИНА, Н.С. ВОРОНОВА

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## К ВОПРОСУ О БОЛЬШИХ НЕЛИНЕЙНОСТЯХ В ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Работа посвящена изучению бозонизации в бозон-фермионных смесях, а именно в электрон-дырочно-фотонных системах с сильной связью. Изучено влияние наличия фотонного поля и темных экситонных состояний на взаимодействие на примере экситонных поляритонов в дихалькогенидах переходных металлов.

A.M. GRUDININA, N.S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ON GIANT NONLINEARITIES IN EXCITON-POLARITON SYSTEMS BASED ON TRANSITION-METAL DICHALCOGENIDES

This work addresses the bosonization in boson-fermion mixtures, in particular, in electron-hole-photon systems in presence of strong coupling. Influence of dark-exciton states and the photon field is examined for exciton-polaritons in transition-metal dichalcogenides.

В работе изучается бозонизация в электрон-дырочно-фотонных системах с экситонным каналом спаривания в рамках подхода функционального интегрирования, ранее развитого для экситонов [1]. Такой подход позволяет учесть в общем случае конечную температуру и т.н. гибкоэкситонный предел, когда наличие бозонного поля в системе сильно модифицирует экситонное поле, и, кроме того, допускает обобщение на случай системы со спиновыми степенями свободы. Учет спиновых степеней свободы позволяет ввести поля темных экситонов, не связывающиеся со светом, которые, тем не менее, дают вклад в поляритонное взаимодействие.

Рассмотрено влияние темноэкситонных состояний в частном случае  $T = 0$  и в жесткоэкситонном пределе, но с учетом спиновых степеней свободы как фермионных составляющих, так и бозонных. Развитый подход позволяет получить матричные элементы экситон-экситонного и экситон-фотонного взаимодействия (см. Рис.1) и предложить возможное объяснение экспериментально наблюдавшихся больших значений констант насыщения в  $\text{MoSe}_2$  и  $\text{WS}_2$  [2-4], отвечающих за экситон-опосредованное экситон-фотонное взаимопревращение: показано, что наличие темноэкситонных полей уменьшает величину раби-расщепления с ростом плотности системы.

Проведенный анализ показывает, что большие поляритонные нелинейности могут возникать из-за темных экситонов и не относятся к гигантским константам взаимодействия, в том числе и для взаимодействия насыщения, что позволяет сохранить водородоподобные представления об экситонах в дихалькогенидах переходных металлов.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «БАЗИС», грант № 22-1-5-30-1.

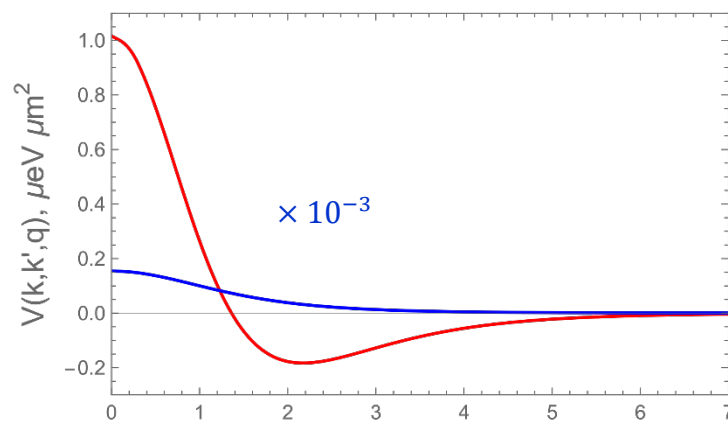


Рис. 1. Матричные элементы экситон-экситонного (красным) и экситон-фотонного (синим) взаимодействий в зависимости от переданного импульса  $q$  для поляритонов в монослое  $\text{MoS}_2$  при  $\mathbf{k} \approx \mathbf{k}'$

### Список литературы

1. V.S. Babichenko and M.N. Kiselev, Journal of Moscow Phys. Soc. 2, 311 (1992).
2. J. Gu, V. Walther, L. Waldecker et al., Nat Commun. 12, 2269 (2021).
3. P. Stepanov, A. Vashisht, M. Klaas et al., Phys. Rev. Lett. 126, 167401 (2021).
4. J. Zhao, A. Fieramosca, K. Dini et al., Nat. Commun. 14, 1512 (2023).

## ИСКАЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ ЭКСИТОННЫХ ПОЛЯРИТОНОВ В ОПТИЧЕСКОМ МИКРОРЕЗОНАТОРЕ

Рассмотрена система нелинейных уравнений, описывающая временную динамику экситонных поляритонов, с учетом эффективного уменьшения силы связи из-за экситонного насыщения. Аналитически проанализировано влияние нелинейностей на собственные частоты в системе, произведено сравнение с экспериментом, а также численно воспроизведены результаты эксперимента с управлением амплитудой Раби-осцилляций с помощью второго импульса резонансной накачки.

M. A. POSAZHENKOV, N. S. VORONOVA

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EXCITON-POLARITON EIGENFREQUENCIES DISTORTION BY NONLINEARITIES IN OPTICAL MICROCAVITIES

We consider the set of nonlinear equations describing temporal dynamics of exciton-polaritons modified by the reduction of strong-coupling by excitons saturation. Effect of nonlinearities on polariton eigenfrequencies is analytically described, and experimental control of Rabi oscillation amplitude by the second laser pulse was numerically reproduced.

Система фотонов и экситонов в микрорезонаторе в режиме сильной связи может быть описана системой уравнений Гросса-Питаевского для фотонной и экситонной подсистем поляритонного конденсата. Для учета экситонного насыщения возможна следующая модификация уравнений:

$$\begin{cases} i\hbar\partial_t\psi_{ph} = \left(\frac{\Delta}{2} - \frac{\hbar^2\bar{\nabla}^2}{2m_{ph}} - i\hat{\Gamma}_{ph}\right)\psi_{ph} + \frac{\Omega\hbar}{2}\left(1 - \frac{|\psi_{ex}|^2}{n_s}\right)\psi_{ex} + i\hbar f, \\ i\hbar\partial_t\psi_{ex} = \left(-\frac{\Delta}{2} - \frac{\hbar^2\bar{\nabla}^2}{2m_{ex}} - i\hat{\Gamma}_{ex} + g|\psi_{ex}|^2\right)\psi_{ex} + \frac{\Omega\hbar}{2}\left(1 - \frac{|\psi_{ex}|^2}{n_s}\right)\psi_{ph}; \end{cases}$$

где  $\psi_{ph}$ ,  $\psi_{ex}$  – конденсатные волновые функции фотонов и экситонов,  $m_{ph}$ ,  $m_{ex}$  – фотонная и экситонная эффективные массы,  $g$  – константа экситон-экситонного взаимодействия,  $\Omega\hbar$  – расщепление Раби,  $\Delta$  – энергетическая отстройка,  $f$  – резонансная накачка,  $\hat{\Gamma}_{ph}$  и  $\hat{\Gamma}_{ex}$  – операторы утечки,  $n_s$  – плотность экситонного насыщения. Модификация уравнений уменьшает расщепление Раби при увеличении экситонной плотности, полностью разрушая режим сильной связи, когда плотность экситонов становится равной  $n_s$ .

Для аналитического анализа влияния нелинейностей на частоты можно считать накачку мгновенной и однородной, производные по координатам от волновых функций тогда можно будет отбросить, и, если пренебречь утечкой, то система окажется достаточно простой для решения системы методами асимптотической теории возмущений [1]. Полученный таким образом результат показывает, что искажение собственных частот нелинейностями существенно зависит от отстройки, а учет насыщения при параметрах, близких к экспериментальным, качественно меняет картину: экситон-экситонное взаимодействие влечет за собой синее смещение обеих собственных частот, добавление экситонного насыщения усиливает сдвиг нижнеполяритонной частоты, но ослабляет сдвиг верхнеполяритонной частоты или даже полностью его компенсирует. Численное моделирование представленной системы полностью согласуется с аналитическими результатами и вполне соответствует эксперименту.

Также с помощью данной системы уравнений удалось численно воспроизвести результаты эксперимента с двойным лазерным импульсом. Первый импульс заселяет систему фотонами, после чего в системе начинают происходить Раби-осцилляции. Второй импульс может как усилить, так и ослабить Раби-осцилляции, в зависимости от разницы во времени между импульсами:

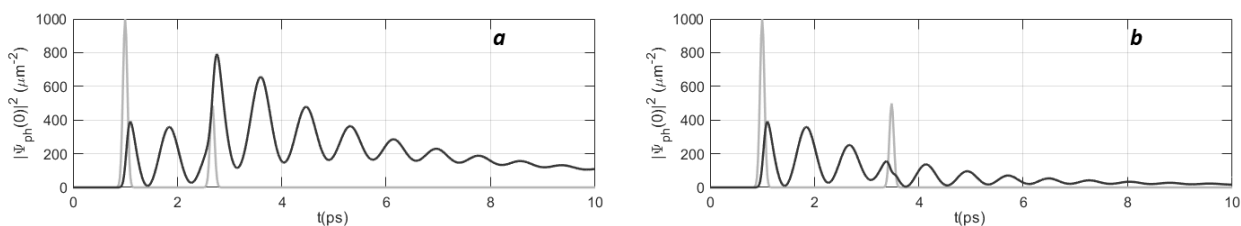


Рис. 1. График фотонной плотности в центре пятна накачки при двойном импульсе с разными временами между импульсами:

a - 1.67пс, b - 2.48пс. Численное моделирование:  $\Delta=0.5$  мэВ,  $\Omega\hbar=5.4$  мэВ,  $g=1.5$  мкэВ мкм<sup>2</sup>,  $n_s=2000$ мкм<sup>-2</sup>.

### Список литературы

1. Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский, «Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний», 1963.



В.И. БОНДАРЕНКО<sup>1</sup>, М.Г. УРИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Москва, Россия, НИЦ «Курчатовский институт»;

<sup>2</sup> Москва, Россия, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»;

## СВОЙСТВА ЗАРЯДОВООБМЕННЫХ ГИГАНТСКИХ СПИН-ДИПОЛЬНЫХ РЕЗОНАНСОВ В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ МАГИЧЕСКИХ МАТЕРИНСКИХ ЯДРАХ: ПОЛУМИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Полумикроскопическая частично-дырочная дисперсионная оптическая модель адаптирована к описанию основных свойств зарядовообменных гигантских спин-мультипольных резонансов в среднетяжелых магических материнских ядрах. Адаптированная модель применена к количественному описанию силовых функций, переходных плотностей и относительных вероятностей прямого однонуклонного распада зарядовообменных гигантских спин-дипольных резонансов в материнских ядрах  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . Некоторые результаты расчетов сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

V.I. BONDARENKO<sup>1</sup>, M.H. URIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow, Russia, NRC "Kurchatov Institute";

<sup>2</sup>Moscow, Russia, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

## PROPERTIES OF CHARGE-EXCHANGE GIANT SPIN-DIPOLE RESONANCES IN MEDIUM-HEAVY MAGIC PARENT NUCLEI: A SEMIMICROSCOPIC DESCRIPTION

The semimicroscopic particle-hole dispersive optical model is adapted for a description of main properties of charge-exchange giant spin-multipole resonances in medium-heavy closed-shell parent nuclei. The adapted model is implemented to evaluating the strength functions, transition densities, and branching ratios of direct one-nucleon decay for charge-exchange giant spin-dipole resonances in the  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$ , and  $^{208}\text{Pb}$  parent nuclei. Some of calculation results are compared with available experimental data.

Представленная работа является очередным этапом выполняемого в рамках полумикроскопической частично-дырочной оптической модели (ЧДДОМ) систематического исследования основных свойств многообразия гигантских резонансов (ГР) в среднетяжелых магических ядрах. Основные свойства ГР включают рассматриваемые в широком интервале энергий возбуждения такие характеристики ГР, как силовая функция, двойная и однократная («проектируемая») переходные плотности, относительные вероятности («бренчинги») прямого однонуклонного распада. В исследование также включено описание свойства нижайшего по энергии обертона ГР. Примеры упомянутых систематических исследований содержатся в работах [1, 2], в которых анализируются свойства изоскалярных мультипольных ГР [1], а также Гамов-Теллеровского резонанса и его обертона [2]. Наряду с выбором феноменологических параметров модели (параметров среднего поля и сил Ландау-Мигдала, а также «фрагментационных» параметров), в [1, 2] содержатся ссылки на работы, в которых даны формулировка и примеры приложений ЧДДОМ. Уникальные возможности модели объясняются совместным учетом в ее рамках основных мод релаксации высокоэнергетических состояний типа частица-дырка, ассоциированных с ГР. К этим модем относятся затухание Ландау, связь с одночастичным континуумом, фрагментационный эффект. В данной работе ЧДДОМ адаптирована к описанию зарядовообменных спин-мультипольных ГР. Адаптированная версия модели использована для количественной интерпретации основных характеристик и параметров зарядовообменных спин-дипольных ГР в материнских ядрах  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . В применении к спин-дипольному ГР в ядре  $^{208}\text{Bi}$  результаты расчетов силовой функции, энергии и полной ширины максимума указанного ГР, парциальных вероятностей прямого однонуклонного распада удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными данными. Содержание работы изложено в [3].

### Список литературы.

1. M.L. Gorelik, S. Shlomo, V.A. Tulupov, and M.H. Urin, Phys. Rev. C **103**, 034302 (2021); Phys. Rev. C **108**, 014328 (2023).
2. V.I. Bondarenko and M.H. Urin, Phys. Rev. C **106**, 024331 (2022).
3. V.I. Bondarenko and M.H. Urin, <https://arxiv.org/abs/2309.17173v3>.

М.Л. ГОРЕЛИК<sup>1</sup>, М.Г. УРИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московская экономическая школа, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## ОПИСАНИЕ ШИРИНЫ ИЗОСКАЛЯРНОГО ГИГАНТСКОГО МОНОПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА В СРЕДНЕТЯЖЕЛЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ЯДРАХ

В рамках полумикроскопической частично-дырочной дисперсионной оптической модели предложено описание ширины изоскалярного гигантского монопольного резонанса в ядрах  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . Оценивается вклад в формирование полной ширины резонанса связи частично-дырочных состояний с многоквасичастичными состояниями и одночастичным континуумом.

M.L. GORELIK<sup>1</sup>, M.H. URIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Economic School, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia

## DESCRIPTION OF THE WIDTH OF ISOSCALAR GIANT MONOPOLE RESONANCE IN MEDIUM-HEAVY SPHERICAL NUCLEI

Within the semimicroscopic particle-hole dispersive optical model, a description of the width of the isoscalar giant monopole resonance in the  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  and  $^{208}\text{Pb}$  nuclei is proposed. The contribution to formation of the resonance total width due to coupling of particle-hole states to many-quasiparticle configurations and the single-particle continuum is estimated.

Изоскалярный гигантский монопольный резонанс, наряду с другими изоскалярными гигантскими мультипольными резонансами, продолжает быть объектом как экспериментальных и теоретических исследований основных свойств ( $L = 0 - 3$ ) резонансов в средне-тяжелых магических ядрах [1, 2]. В работах [2] исследования выполнены в рамках частично-дырочной дисперсионной оптической модели (ЧДДОМ), обладающей уникальными возможностями в описании многообразия гигантских резонансов (ГР) в указанных ядрах. Эти возможности обусловлены совместным учетом основных мод релаксации высокоэнергетических возбуждений типа частица-дырка, ассоциированных с ГР. В рамках ЧДДОМ возможно описание основных характеристик ГР: силовых функций, переходных плотностей, вероятностей прямого однонуклонного распада.

В данной работе представлены результаты детального изучения полной ширины изоскалярного гигантского монопольного резонанса в рамках ЧДДОМ. На примерах, относящихся к изоскалярному монопольному ГР в  $^{90}\text{Zr}$  и  $^{208}\text{Pb}$ , выполнено сравнение расчетных силовых функций с полученными из анализа сечений возбуждения указанных ГР в  $(\alpha, \alpha')$ -реакциях [3, 4, 5]. На данный момент такой анализ выполняется экспериментаторами с использованием независимых от энергии возбуждения переходных плотностей, полученных в рамках коллективной модели, что возможно является причиной некоторого расхождения полученных экспериментальных данных. Описание данных сечений реакций невозможно без учета всех возможных вкладов в формирование полной (наблюдаемой) ширины изоскалярного гигантского монопольного резонанса: фрагментация входных частично-дырочных состояний (затухание Ландау), связь частично-дырочных состояний с одночастичным континуумом (ширины прямого нуклонного распада ГР) и с многоквасичастичными состояниями (спредовая ширина). Расчеты в рамках ЧДДОМ основных свойств изоскалярного гигантского монопольного резонанса проведены для атомных ядер  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Sn}$  и  $^{208}\text{Pb}$ . Часть полученных результатов сравниваются с соответствующими экспериментальными данными и результатами других теоретических подходов, что позволяет заключить, что ЧДДОМ обладает рядом преимуществ и является достаточно эффективным инструментом для теоретического исследования и описания свойств гигантских резонансов.

### Список литературы.

1. Garg U. and Colo G. // *Progr. Part. Nucl. Phys.* 2018 V. 101 P. 55.
2. Gorelik M.L., Shlomo S., Tulupov B.A., and Urin M.H. // *Phys. Rev. C* 2021 V. 103 P. 034302, *Phys. Rev. C* 2023 V. 108 P. 014328.
3. Gupta Y.K., Howard K.B., Garg U., Matta J.T. et al. // *Phys. Rev. C* 2018 V. 97 P. 064323
4. Youngblood D.H., Lui Y.-W., Krishichayan, Button J. et al. // *Phys. Rev. C* 2013 V. 88 P. 021301(R).
5. Bahini A., Neumann-Cosel von P., Carter J., Usman I.T. et al. // *Phys. Rev. C* 2023 V. 107 P. 034312, *Phys. Rev. C* 2024 V. 109 P. 014325.

## СИЛЬНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКАЛЯРНЫХ ВОЛН В НЕУПОРЯДОЧЕННОМ ОБРАЗЦЕ

Из уравнения Бетэ-Солпитера (БС), в предположении о «куперонной» природе сильной локализации, получена система самосогласованных диффузионных уравнений для пропагатора плотности энергии и коэффициента диффузии излучения в конечном образце с неоднородностями произвольного размера. Показано, что куперонный вклад в ядро уравнение БС не влияет на энергетический баланс и оптическая теорема остаётся такой же, как и без учёта интерференции волн. В случае Q1D геометрии вычислены длина локализации и коэффициент прохождения волн в оптически длинном волноводе.

Е.Е.GORODNICHEV, V.V. MARINYUK  
 National Research Nuclear University "MEPhI"

## STRONG LOCALIZATION OF SCALAR WAVES IN A DISORDERED SAMPLE

From the Bethe-Salpeter (BS) equation, under the assumption of the "cooperon" nature of strong localization, a system of self-consistent diffusion equations is obtained for the energy density propagator and the radiation diffusion coefficient in a finite sample with large-scale inhomogeneities. It is shown that the couperon contribution to the core of the BS equation does not affect the energy balance and the optical theorem remains the same as without taking into account wave interference. In the case of Q1D geometry, the localization length and transmission coefficient of waves in an optically long waveguide are calculated.

В середине 1980-ых годов была развита самосогласованная теория сильной (андерсоновской) локализации электронов в металлах с примесями [1]. В работе [2] для описания локализации скалярных волн в ограниченных образцах предложено феноменологическое обобщение теории [1]. В [3] с помощью развитого в [4] метода суммирования комбинации последовательностей лестничных и веерных диаграмм, уравнения работы [2] получены в частном случае конечного образца с малыми рассеивателями.

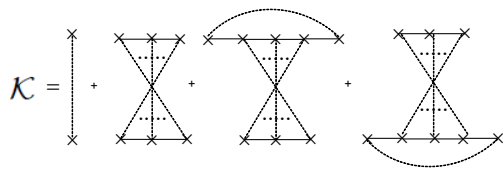
В работе получены уравнения самосогласованной теории сильной локализации скалярных волн в оптически толстом непоглощающем образце с неоднородностями произвольного размера. Диффузионное уравнение для пропагатора плотности энергии имеет вид

$$\nabla_{\vec{r}} [D(\vec{r}) \nabla_{\vec{r}} \Gamma(\vec{r}, \vec{r}')] = -\frac{1}{4\pi} \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (1)$$

где коэффициент диффузии  $D(\vec{r})$  выражается через ядро уравнения Бёте-Солпитера  $K(\vec{n}, \vec{n}' | \vec{r})$  и массовый оператор  $\Sigma(k_0)$ :

$$\frac{1}{D(\vec{r})} = 3 \cdot \left[ \frac{\text{Im} \Sigma(k_0)}{k_0} - \frac{1}{4\pi} \cdot \int d\vec{n} d\vec{n}' (\vec{n} \vec{n}') K(\vec{n}, \vec{n}' | \vec{r}) \right] \quad (2)$$

$\vec{n}, \vec{n}'$  - единичные векторы вдоль направлений распространения рассеянных волн. При выводе (1), (2) предполагалось, что выполняются условия слабой локализации ( $\lambda \ll \ell, \lambda = 2\pi/k_0, \ell$  - длина волны и длина свободного пробега) и минимальный линейный размер образца  $L_{\min}$  намного превышает транспортную длину



$L_{\min} \ll \ell_r$ . В предположении о доминирующем вкладе куперонов, ядро  $K(\vec{n}, \vec{n}' | \vec{r})$  определяется диаграммами, изображёнными на рисунке. Учёт интерференции (вторая, третья и четвёртая диаграммы) не изменяет энергетического баланса. Поэтому вытекающая из кинетического уравнения Больцмана оптическая теорема остаётся справедливой и

первое слагаемое справа в (2) с точностью до тройки совпадает коэффициентом рассеяния  $\sigma$ , ( $\sigma = |\text{Im} \Sigma(k_0)|/k_0$ ). Решение системы (1), (2) в самосогласованном приближении [1-3] позволяет найти коэффициент диффузии и коэффициент прохождения волн через Q1D и 2D-образцы. В частности, для Q1D-геометрии (волновод) коэффициент прохождения определяется следующей формулой

$$T = \frac{2\ell_r}{3\ell_{loc}} \cdot \frac{1}{\exp(L/\ell_{loc}) - 1} \quad (3)$$

где  $\ell_{loc} = 2\ell_r N/3$  - длина локализации,  $N = \pi A/\lambda^2$  и  $A$  - число мод и поперечное сечение волновода. В случае относительно короткого волновода,  $L \ll \ell_{loc}$ , из (3) для  $T$  следует "классическая" формула Больцмана  $T = 2\ell_r/3L$ . В длинном образце,  $L \geq \ell_{loc}$ , коэффициент прохождения экспоненциально убывает с увеличением длины волновода,  $T = (2\ell_r/3\ell_{loc}) \cdot \exp(-L/\ell_{loc})$ .

### Список литературы

- [1]. D. Vollhardt, P. Wolfe, in *Electronic Phase Transitions*, Elsevier Science, Amsterdam, (1992), p.1
- [2]. B.A. van Tiggelen, A. Lagendijk, D.S. Wiersma, *Phys.Rev. Lett.* {bf 84}, 4333, (2000)
- [3]. N. Cherroret, S.E. Skipetrov, *Phys.Rev.* {bf E77}, 046608, (2008)
- [4]. E.Akkermans, G. Montambaux, *Mesoscopic physics of electrons and photons*, Cambridge, University Press, 2007.

## РАСЧЕТ СПЕКТРАЛЬНО-УГЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛИНЕЙНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСАХ

Разработан код для численного расчета спектрально-угловых распределений фотона при однократном нелинейном комптоновском рассеянии электрона на лазерном импульсе с произвольной поляризацией и огибающей. С его помощью исследована зависимость угловых распределений и спектра рассеянного фотона от длительности, интенсивности и формы огибающей в случае круговой поляризации импульса.

M.P. MALAHOV, A.M. FEDOTOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## CALCULATION OF SPECTRAL AND ANGULAR CHARACTERISTICS OF NONLINEAR COMPTON SCATTERING BY LASER PULSES

A code has been developed for the numerical calculation of the photon spectral-angular distributions in a single nonlinear Compton scattering of an electron by a laser pulse with arbitrary polarization and envelope. We use it to study the dependence of the angular distributions and the spectrum of the scattered photon on duration, intensity and envelope shape in the case of circular polarization of the pulse.

В работе изучаются спектральные и угловые распределения фотонов, рассеянных электроном при лобовом столкновении с плосковолновым лазерным импульсом в нелинейном режиме. Известно аналитическое решение для случая рассеяния на плоской монохроматической волне, а при наличии огибающей спектрально-угловое распределение можно получить только численно. Для этого был разработан код для вычисления интеграла по фазе импульса в матричном элементе соответствующего квантово-электродинамического процесса в представлении Фарри [1]. В интересующем нас режиме подынтегральная функция быстро осциллирует, поэтому для расчета интеграла используется обобщенный метод Филона, основанный на работе [2]. Для расчета отдельных спектральных и угловых распределений далее выполняется интегрирование по углам вылета и частоте рассеянного фотона соответственно. Для его ускорения код распараллелен и запускается на кластере. Разработанный код позволяет выполнять расчеты для произвольных энергий электрона, а также интенсивности, поляризации, формы огибающей и длительности лазерного импульса. При отладке кода использовались аналитические решения для случаев прямоугольной огибающей и рассеяния назад на импульсах специальной формы.

С помощью разработанного кода исследованы зависимости спектрально-угловых, угловых распределений и спектра рассеянного фотона в зависимости от интенсивности и длительности импульса. Рассмотрен случай циркулярной поляризации лазерного импульса с огибающими  $g(\phi) = \exp(-(|\phi|/\Delta\phi)^r)$  при  $r = 2, 3, 4, 6, 16$ . Примеры полученных распределений изображены на рис. 1-3. Видно, что по сравнению со случаем плоской монохроматической волны гармоники в спектре уширены и приобретают субпиковую структуру (рис. 1). Она возникает в результате интерференции вкладов в рассеяние фотона в моменты одинаковой амплитуды на подъеме и спаде огибающей. При рассеянии на коротких импульсах в существенно нелинейном режиме угловое распределение азимутально ассиметрично (рис. 2). Также видно сильное отличие спектра рассеянного фотона для гауссовой огибающей от случая прямоугольной огибающей, однако с ростом степени  $r$  различие

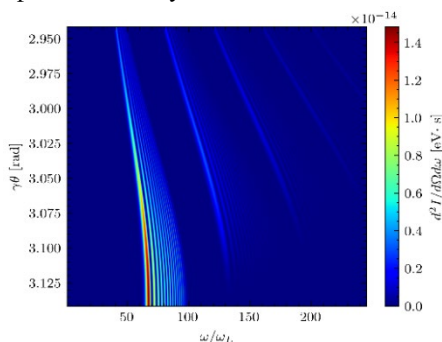


Рис. 1. Спектрально-угловое распределение рассеянного фотона с  $r = 2, a_0 = 1$ ,

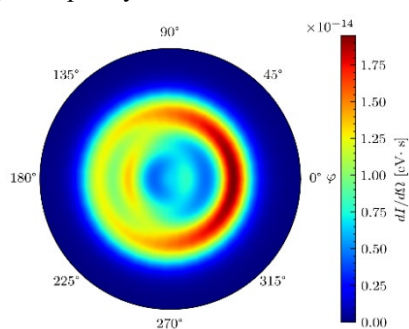


Рис. 2. Угловое распределение рассеянного фотона с  $r = 2, a_0 = 5, \gamma = 5$ ,

$$\Delta\phi = 6$$

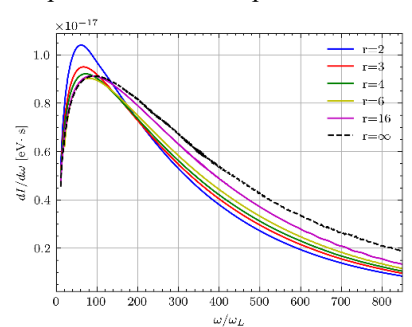


Рис. 3. Спектры рассеянного фотона, усредненные по 50 точкам с  $a_0 = 5, \gamma = 5, \Delta\phi = 10$  и  $r = 2, 3, 4, 6, \infty$ , где  $\infty$  соответствует случаю прямоугольной огибающей

пропадает (рис.3).

### Список литературы

1. Seipt D., Kämpfer B. // Phys. Rev. A, 2011, Vol. 83, p. 022101.
2. Thomas A. G. R. // Phys. Rev. ST Accel. Beams, 2010, Vol. 13, p. 020702

Ю.В. СЕЛИВАНОВ, А.М. ФЕДОТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ФИНАЛЬНОГО ЧИСЛА ЧАСТИЦ В МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАСКАДА

Рассматривается модель электромагнитного каскада с фиксированным коэффициентом передачи энергии в процессах излучения. Получена точная формула для финального числа частиц методом кинетических уравнений, продемонстрирована независимость финального числа частиц от длин свободного пробега фотонов и лептонов. Проанализировано поведение финального числа частиц при высоких энергиях затравочного электрона.

Y.V. SELIVANOV, A.M. FEDOTOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ANALYTICAL COMPUTATION OF FINAL NUMBER OF PARTICLES IN A TOY MODEL FOR AN ELECTROMAGNETIC CASCADE

A model for an electromagnetic cascade with fixed energy transfer coefficient for photon emission processes is considered. A precise formula for final number of particles is obtained through solving kinetic equations. It is demonstrated that the final number of particles does not depend on free run lengths of photons and leptons. Behavior of the final number of particles at high seed electron energies is analyzed.

Электромагнитные каскады – широко распространённый тип процессов, представляющий интерес для различных областей физики и технологий, включая исследования в области космофизики [1, 2] и поведения вещества в сверхсильных полях[3]. Важной характеристикой электромагнитного каскада является финальное число частиц. В связи с отсутствием полного аналитического описания для электромагнитного каскада, представляют интерес модельные задачи, разрешимые аналитически.

В рассматриваемой модели электромагнитного каскада происходят только процессы фоторождения пар и излучения фотонов лептонами. Модельные параметры:  $\varepsilon_0$  – энергия затравочного электрона,  $E_0$  – минимальная энергия, необходимая для процессов фоторождения пар и излучения фотонов,  $k$  – коэффициент передачи энергии при излучении фотона, а также  $L_e, L_\gamma$  – длины свободного пробега лептонов и фотонов соответственно. В процессах фоторождения энергия фотона делится между лептонами ровно пополам. При такой постановке задачи могут быть получены в явном виде функции распределения фотонов и лептонов по энергиям, а также формула для финального числа частиц.

Кинетические уравнения, метод составления которых описан в [4], в принятых приближениях сводятся к системе дифференциальных уравнений относительно функций распределения частиц по энергиям и решаются с применением преобразования Меллина [5] и последующего восстановления оригиналов. Формула для финального числа частиц имеет следующий вид:

$$N_{fin} = \sum_{E_0 \leq \varepsilon_0 (1-k)^p (k/2)^l \leq E_0 / (1-k)} 2^l C_{p+l}^l + \sum_{E_0 \leq \varepsilon_0 (1-k)^p (k/2)^l \leq E_0 / k} 2^l C_{p+l}^l + \sum_{E_0 \leq \varepsilon_0 (1-k)^p (k/2)^l k \leq 2E_0} 2^l C_{p+l}^l,$$

где  $C_n^m$  – биномиальный коэффициент, суммирование производится по всем целым неотрицательным  $p$  и  $l$ , удовлетворяющим неравенствам, указанным под соответствующими знаками суммы.

Метод решения позволяет в предельном случае  $\varepsilon_0 \gg E_0$  получить в первом приближении следующую формулу для финального числа частиц:

$$N_{fin}^{(1)} = \frac{\varepsilon_0}{E_0} \cdot \frac{1+k}{(1-k) \ln(1/(1-k)) + k \ln(2/k)}$$

Полученные выражения дают качественное и количественное описания поведения финального числа частиц в рассматриваемой модели.

### Список литературы

1. Auger P. et al. Extensive cosmic-ray showers //Reviews of modern physics. – 1939. – Т. 11. – №. 3-4. – С. 288.
2. Gaisser T. K. Cosmic rays and particle physics //Comments on Nuclear and Particle Physics. – 1982. – Т. 11. – №. 1. – С. 25-39.
3. Fedotov A. et al. Advances in QED with intense background fields //Physics Reports. – 2023. – Т. 1010. – С. 1-138.
4. Landau L. D., Rumer G. The cascade theory of electronic showers //Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1938. – Т. 166. – №. 925. – С. 213-228.
5. Свешников А. Г., Тихонов А. Н. Теория функций комплексной переменной. – Наука, 1979.

## ЛИНЕЙНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АЛГЕБРЫ ЛИ ГРУППЫ ДИФФЕОМОРФИЗМОВ

Предложен метод построения представлений алгебры Ли группы диффеоморфизмов (т.е. преобразований координат общего вида) в  $d$ -мерном пространстве. Описана общая структура пространства представления, исследовано действие генераторов алгебры Ли на вектора пространства представления. Исследованы характеристики представлений, которые не зависят от выбора базиса пространства представлений. В двумерном пространстве построены новые представления, которые не сводятся к тензорным полям.

M.I. GOZMAN

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Russia

## LINEAR REPRESENTATIONS OF LIE ALGEBRA OF DIFFEOMORPHISM GROUP

A method for constructing representations of the Lie algebra of a group of diffeomorphisms (i.e., general transformations of coordinates) in  $d$ -dimensional space is proposed. The general structure of the representation space is described, the action of Lie algebra generators on the vectors of the representation space is investigated. The characteristics of the representations are obtained that don't depend on the choice of basis vectors of the representation space. In two-dimensional space new representations are constructed that can't be reduced to the tensor fields.

Оператор инфинитезимального диффеоморфизма  $x^\mu = x'^\mu + \varepsilon f^\mu(x')$  ( $\varepsilon$  — малое) на пространстве представления имеет вид

$$\tilde{L}_{x=x'+\varepsilon f(x')} = \text{id} - i\varepsilon \check{I}_f(x) = \text{id} - i\varepsilon \int dx f^\mu(x) \check{I}_\mu(x).$$

Операторы  $\check{I}_f(x)$  — это генераторы диффеоморфизмов. Для них получено коммутационное соотношение

$$[\check{I}_f(x), \check{I}_g(x)] = i \int dx \left( f^\sigma(x) \frac{\partial g^\mu}{\partial x^\sigma}(x) - g^\sigma(x) \frac{\partial f^\mu}{\partial x^\sigma}(x) \right) \check{I}_\mu(x).$$

В качестве базиса пространства представления предложено использовать вектора, собственные для генераторов малых трансляций  $\check{I}_\tau^{\text{tr}}$ . Эти вектора обозначены  $e_{pn}$ , где  $p_\tau$  — собственные значения ( $\check{I}_\tau^{\text{tr}} e_{pn} = p_\tau e_{pn}$ ),  $n$  — индекс, различающий базисные элементы с одинаковыми  $p$ . Индекс  $n$  принимает  $M$  различных значений, и число  $M$  называется мультиплетностью представления.

Вводятся операторы  $\check{I}_\mu(\Delta)$ , которые, действуя на элементы базиса  $e_{pn}$ , меняют их собственные значения  $p_\tau$ :

$$\check{I}_\mu(\Delta) e_{pn} = \sum_{m=1}^M (A_\mu^p)^m e_{p+\Delta, m}.$$

Коэффициенты  $(A_\mu^p)^m$  удобно представить в виде матриц размером  $M \times M$ . Для них получено уравнение

$$A_\mu^p A_\tau^{p+\Delta+\Delta'} - A_\tau^{p+\Delta'} A_\mu^{p+\Delta} = \Delta_\tau A_\mu^p - \Delta'_\mu A_\tau^{p+\Delta+\Delta'}.$$

Доказано, что матрицы  $A_\mu^p$  полностью определяют представление алгебры Ли группы диффеоморфизмов.

Матрицы  $A_\mu^p$  определены неоднозначно, поскольку базисные вектора  $e_{pn}$  пространства представления можно выбирать по-разному. В связи с этим возникает вопрос о выборе характеристик представления, которые не зависят от выбора базиса. Показано, что существует базис, в котором матрицы  $A_\mu^p$  обладают свойством:

$$\left. \frac{\partial}{\partial \Delta_\tau} A_\mu^p \right|_{\Delta \rightarrow 0} = \frac{p_\mu}{p_\tau} J_\mu^\tau,$$

где  $J_\mu^\tau$  — матрицы размером  $M \times M$ , не зависящие от  $p$ . Эти матрицы могут использоваться в качестве характеристик представления.

Для двумерного пространства построены новые представления алгебры Ли группы диффеоморфизмов, обладающие мультиплетностью  $M = 2$  и  $M = 3$ . Доказана неприводимость этих представлений. Доказано также, что вектора пространства этих новых представлений не допускают описания в виде тензорных полей.

### Список литературы

1. Goldin G. Lectures on diffeomorphism groups in quantum physics // Contemporary Problems in Math. Physics. 2004. P. 3 – 93.
2. Вершик А. М., И. М. Гельфанд И. М., Граев М. И. Представления группы диффеоморфизмов // УМН. 1975. Т. 30. С. 3 – 50.
3. Mann K. The structure of homeomorphism and diffeomorphism groups // Notices of the American mathematical society. 2021. Vol. 68, №4. P. 482 – 492.

Д. И. ТЮРИН, С. В. ПОПРУЖЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ НА ДВОЙНУЮ ИОНИЗАЦИЮ АТОМОВ В ИНТЕНСИВНОМ ЛАЗЕРНОМ ПОЛЕ**

Исследовано влияние электрон-электронного взаимодействия на вероятность двукратной туннельной ионизации атомов и отрицательных ионов в поле интенсивного лазерного излучения. С помощью численного решения нестационарного уравнения Шредингера для двухэлектронной одномерной и двумерной систем изучена возможность коррелированного туннелирования двух электронов в поле сверхкороткого униполярного импульса в случае, исключающем эффект перерасеяния. Показано, что при ионизации одномерной двухэлектронной системы электрон-электронное взаимодействие подавляет канал коллективной ионизации. Обсуждается применимость одноэлектронного приближения для описания последовательной туннельной ионизации. Показано, что учет электронных корреляций можеткратно уменьшать вероятность ионизации второго электрона по сравнению со случаем независимого туннелирования невзаимодействующих электронов.

D. I. TYURIN, S. V. POPRUZHENKO

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **EFFECT OF ELECTRON CORRELATIONS ON DOUBLE IONIZATION OF ATOMS IN INTENSE LASER FIELDS**

We consider the influence of the electron-electron interaction on the probability of double tunnel ionization of atoms and negative ions in the field of intense laser radiation. By solving numerically the time-dependent Schrödinger equation for two-electron one- and two-dimensional systems we investigate a possible channel of two-electron collective tunneling in the field of an ultrashort unipolar pulse when the effect of rescattering is eliminated. We show that for the one-dimensional two-electron system the electron-electron repulsion suppresses the collective channel. We also discuss applicability of the single-electron approximation for description of sequential tunnel ionization and show that the electron correlations can suppress the probability of the second electron tunneling by several times, compared to the case of independent tunneling of non-interacting electrons.

Интерес к многократной ионизации атомов и ионов в сильных лазерных полях обусловлен возможностью изучения корреляционных эффектов, связанных с электрон-электронным взаимодействием. Одним из таких эффектов является перерасеяние электрона на родительском ионе. Данный механизм ионизации в настоящее время подробно описан теоретически и проверен в эксперименте [1]. Также в литературе обсуждается другой возможный канал ионизации, связанный с электрон-электронным взаимодействием: коллективное туннелирование [2]. В работе [3] было показано, что если два электрона могут туннелировать вместе как единая квазичастица, то это должно качественно изменить импульсное распределение двукратных ионов (под двукратным ионом мы понимаем здесь атомную систему, потерявшую два электрона относительно своего исходного состояния: в случае отрицательно заряженных ионов двукратный ион будет иметь заряд +1) по сравнению со случаем последовательной независимой ионизации.

В данной работе с помощью численного решения зависящего от времени двухчастичного уравнения Шредингера мы изучаем возможность образования такой квазичастицы в поле сильного электромагнитного импульса, представляющего собой униполярный короткий всплеск электрического поля. В таком импульсе отсутствует эффект перерасеяния, что позволяет исследовать альтернативные корреляционные механизмы. Анализ формул Переломова-Попова-Терентьева [4] для вероятности последовательной ионизации и их обобщения [2] на случай коллективной ионизации показал, что коллективный канал должен вносить наиболее сильный вклад при ионизации отрицательного иона брома. Однако численное решение нестационарного уравнения Шредингера демонстрирует, что электрон-электронное отталкивание существенно препятствует образованию квазичастицы из двух электронов, что подавляет коллективный канал ионизации. Особенно сильно это подавление проявляется для одномерных систем.

Кроме этого в работе обсуждается влияние электрон-электронного взаимодействия на применимость одноэлектронного приближения для описания последовательной ионизации. Численные расчеты показали, что в одномерной двухэлектронной системе электронные корреляции могуткратно уменьшить вероятность ионизации второго электрона по сравнению со случаем, когда туннелирование происходит независимо.

### *Список литературы*

1. Becker W. et al. // *Rev. Mod. Phys.* 2012. V. 84. P. 1011.
2. Зон Б.А. // *ЖЭТФ.* 1999. Т. 116. С. 410.
3. Попруженко С.В., Ломоносова Т.А. // *Письма в ЖЭТФ.* Т. 113. С. 320.
4. Переломов А.М., Попов В.С., Терентьев М.В. // *ЖТЭФ.* 1966. Т. 50 С. 1393; Т. 51 С. 309.

А.И. АЛЕКСЕЕНКО, А.М. ФЕДОТОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАСПАД СКАЛЯРНОЙ ЧАСТИЦЫ В ПОЛЕ ПЛОСКОЙ ЦИРКУЛЯРНО ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

Рассмотрена простейшая модель распада заряженной скалярной частицы на две скалярные (заряженную и нейтральную) в поле сильной плоской циркулярно поляризованной электромагнитной волны. Получены аналитические выражения для скорости распада в этой модели.

A.I. ALEXEENKO, A.M. FEDOTOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DECAY OF A SCALAR PARTICLE IN THE FIELD OF A PLANE CIRCULARLY POLARIZED ELECTROMAGNETIC WAVE

The simplest model of the decay of a charged scalar particle into two scalars (charged and neutral) in the field of a strong plane circularly polarized electromagnetic wave is considered. Analytical expressions for the decay rate in this model are obtained.

Одной из важных прикладных задач, стоящих перед физикой сверхсильных лазерных полей, является управление скоростью распадов ядер и заряженных частиц с помощью мощных лазерных полей. Значительные достижения в этой области могли бы изменить современный подход к утилизации ядерных отходов. Однако пока разные исследования дают противоречащие друг другу результаты.

В работе рассматривается простейшая модель распада одной частицы на две без кинематических приближений. Расчет проведен в рамках скалярной модели, точно по взаимодействию заряженных частиц с волной и в первом порядке теории возмущений по взаимодействию между частицами. Рассмотрен случай распада, кинематически разрешенного и в отсутствии поля.

Взаимодействие частиц между собой описывается с помощью лагранжиана взаимодействия  $\mathcal{L}_{int} = g(\psi^* \phi + \psi \phi^*) \chi$ , где  $g$  – константа взаимодействия,  $\psi$  и  $\phi$  – заряженные поля,  $\chi$  – нейтральное поле. В качестве волновых функций заряженных частиц используются волковские функции – решения уравнения Клейна-Гордона-Фока в поле плоской волны. Тогда выражение для полной вероятности распада имеет вид суммы парциальных вероятностей распада начальной частицы с поглощением (испусканием)  $s$  фотонов волны. Однако такое представление неудобно как для вывода аналитических выражений, так и для численного расчета из-за медленной сходимости суммы, поэтому было получено другое представление в виде двойного интеграла [1]

$$\mathcal{W} \propto g^2 \int_0^\infty \frac{du}{(1+u)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\mu}{2\pi i} \frac{e^{-i\mu\sigma(u)}}{\mu - i0} \exp\left(i \frac{2u\xi^2}{\eta\mu} \left(\sin^2 \frac{\mu}{2} - \frac{\mu^2}{4}\right)\right), \quad (1)$$

где

$$\sigma(u) = \frac{m_1^2 + m_2^2 - m^2 + um_1^2 + \frac{m_2^2}{u}}{2\eta m^2}$$

– число «фотонов», поглощенных (излученных) свободной распадающейся частицей. Параметры  $\xi$  и  $\eta$  – релятивистские инварианты, описывающие взаимодействие частиц с полем: инвариант  $\xi$  отвечает за кинематический эффект, связанный с замедлением времени и изменением фазового объема реакции за счет колебаний начальной и конечной заряженных частиц в волне, в то время как инвариант  $\xi\eta \equiv \chi$  связан с динамическим эффектом, заключающемся в модификации закона сохранения за счет поглощения энергии из волны [2]. С помощью полученной формулы было исследовано асимптотическое поведение вероятности распада: в пределе сильного поля ( $\chi \gg 1$ ) интеграл в формуле (1) стремится к постоянному значению 1/3 по закону  $\sim 1/\sqrt{\chi}$ , а в пределе слабого поля ( $\chi \ll 1$ ) к вероятности свободного распада появляется поправка  $\sim \chi^2$ .

### Список литературы

1. Akhmedov E. K. Beta decay and other processes in strong electromagnetic fields //Physics of Atomic Nuclei. – 2011. – V. 74. – P. 1299-1315.
2. Ритус В. И., Никишов А. И. Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле //Труды ФИАН. – 1979. – Т. 111. – С. 497-618.



М.А. КАЛИНИЧЕВ, О.Е. ВАЙС, В.Ю. БЫЧЕНКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СВЯЗЬ ПРИ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Современные технологии позволяют создавать ультракороткие лазерные импульсы длительностью в несколько периодов светового поля. При моделировании таких лазерных импульсов возникает необходимость учета связи их пространственного и временного распределений. В данном исследовании на основе дифракционных интегралов Стреттона-Чу была разработана модель ультракоротких лазерных импульсов сфокусированных параболическим зеркалом с учетом их конечной длительности. Также были рассмотрены условия, при которых учет пространственно-временных связей оказывается необходимым.

М.А. KALINICHEV, O.E. VAIS, V.YU. BYCHENKOV

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## SPATIO-TEMPORAL COUPLING DURING TIGHT FOCUSING OF ULTRASHORT LASER PULSES

Modern technologies make it possible to generate ultrashort laser pulses with a duration of several light periods. When modeling such laser pulses, it becomes necessary to take into account the coupling between their spatial and temporal distributions. In this study, based on the Stratton-Chu diffraction integrals, a model was developed for ultrashort laser pulses focused by a parabolic mirror, taking into account the pulse finite duration. The conditions under which taking into account spatio-temporal coupling is necessary were also considered.

Разработка новых методов усиления лазерных импульсов, таких как CPA и OPCPA, обеспечила как рост энергии лазерных импульсов, так и их пиковой мощности. Так в настоящее время передовые лазерные установки позволяют генерировать лазерные импульсы мультитераваттного уровня мощности. Дальнейшего увеличения мощности лазера можно достичь за счет уменьшения длительности импульса, например, используя метод сжатия после компрессора (CafCA) [1]. В работе [2] уже было показано, что этот подход позволяет сжать лазерный импульс до 10 фс практически без потерь энергии. В то же время для моделирования такого короткого лазерного импульса требуются новые подходы, учитывающие связь пространственного и временного распределений, которая возникает в следствие конечной ширины спектра лазерного излучения. В работе был рассмотрен один из таких подходов, который позволяет моделировать ультракороткие лазерные импульсы, сфокусированные внеосевым параболическим зеркалом в пятно диаметром вплоть до дифракционного предела.

Для моделирования монохроматического лазерного пучка, острогофокусированного параболическим зеркалом, были использованы дифракционные интегралы Стреттона-Чу [3, 4, 5]. Данная модель была расширена на лазерные импульсы конечной длительности (и, как следствие, конечной ширины спектра) путем интегрирования вклада монохроматических составляющих электромагнитного поля в результирующее пространственно-временное распределение компонент сфокусированного лазерного импульса.

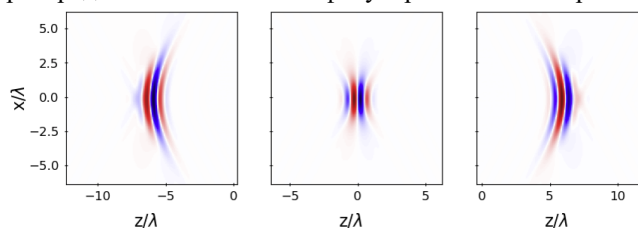


Рис. 1. Динамика компоненты поляризации  $E_x$  лазерного импульса длительностью 3 фс,  $f_{\#} = 1$ .

Было проведено исследование связи пространственного и временного распределений сфокусированного лазерного импульса для различных параметров лазерного импульса и фокусирующей системы. Были определены параметры, при которых искажения пространственно-временного профиля малы по сравнению с домножением огибающей лазерного импульса на пространственное распределение сфокусированного лазерного пучка. Отдельно рассмотрено влияние пространственно-временной связи на распределения электромагнитных полей вблизи фокуса лазерного пучка и получено, что данный эффект возникает только в случае ультракоротких лазерных импульсов (несколько световых периодов, см. Рис. 1). Проведено численное моделирование лазерного импульса, сфокусированного внеосевым параболическим зеркалом, и показана несимметричность распределения полей лазерного импульса относительно оси его распространения.

Исследование выполнено при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (в рамках соглашения № 075-15-2021-1361) и Фонда развития теор. физики и математики «БАЗИС» (грант № 22-1-3-28-1).

### Список литературы

1. E. A. Khazanov, S. Yu. Mironov, G. Mourou // Phys. Usp. 2019. Vol. 62. P. 1096.
2. A. Shaykin, V. Ginzburg, I. Yakovlev and others // High Power Laser Sci. Eng. 2021. Vol. 9. P. E54.
3. S.-W. Bahk, P. Rousseau, T.A. Planchon and others // Appl. Phys. B. 2005. Vol. 80. P. 823–832.
4. P. Varga, P. Torok // J. Opt. Soc. Am. A. 2000. Vol. 17. P. 2081.
5. O.E. Vais, V.Y. Bychenkov // Appl. Phys. B. 2018. Vol. 124: P. 211.

Ю.К. ГАГАРИН, Ф.А. КОРНЕЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **АВТОРЕЗОНАНСНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНА В СВЕРХСИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

работе рассмотрен механизм авторезонансного ускорения электрона в присутствии сверхсильного магнитного поля. Показана возможность эффективного ускорения заряженной частицы в продольном магнитном поле Гауссовым лазерным импульсом релятивистской интенсивности, оценено значение резонансного магнитного поля с учётом наличия фазы Гои и кривизны волнового фронта. Зависимость динамики электрона от неоднородности внешнего магнитного поля исследована в рамках гауссова поперечного профиля. Получена связь между характерной величиной поля и масштабом неоднородности, определяющая оптимальные параметры для околорезонансного режима ускорения.

Y.K. GAGARIN, Ph.A. KORNEEV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **AUTORESONANCE ELECTRON ACCELERATION IN SUPERINTENSE MAGNETIC FIELDS**

This work considers the autoresonance electron acceleration regime in a superintense applied magnetic field. Possibility of effective charged particle acceleration with a relativistic Gaussian laser beam in a longitudinal magnetic field is shown, a resonant magnetic field value is estimated with the Gouy phase and the wavefront curvature taken into account. Electron dynamics dependence on the external magnetic field inhomogeneity is studied assuming a gaussian transverse profile. Bound between a characteristic field value and an inhomogeneity scale is found determining optimal parameters for near-resonant acceleration regime.

Явление авторезонансного ускорения заряженной частицы электромагнитной волной в присутствии магнитного поля, направленного вдоль распространения волны, впервые описано в работах [1-2]. В случае падения плоской волны на заряженную частицу в продольном магнитном поле в процессе движения сохраняется некий интеграл, приводящий к автоматической синхронизации фаз электрического поля волны и скорости частицы. Резонанс наступает при совпадении ларморовской частоты движения частицы во внешнем магнитном поле с частотой электромагнитной волны. Для эффективного ускорения в авторезонансном режиме достаточно выполнения этого условия в начальный момент времени, для чего во многих работах предлагается использовать изначально релятивистский пучок электронов [3] или терагерцовые импульсы [4], поскольку высокие лазерные частоты требуют сверхинтенсивных магнитных полей.

Однако, такие поля могут быть получены непосредственно, например, при облучении мишеней с нарушенной симметрией релятивистскими лазерными импульсами [5]. При взаимодействии лазера с такой мишенью в ней возбуждаются разрядные токи, генерирующие аксиальное магнитное поле порядка 10 кТл. В образовавшейся замагнитненной плазме такие поля могут существовать на протяжении нескольких пикосекунд, что соответствует характерному времени авторезонансного взаимодействия электронов с лазерным импульсом. Таким образом, в полученной квазистационарной структуре возможно эффективное ускорение изначально покоящихся электронов.

Для исследования влияния начальных условий на процесс ускорения покоящихся электронов лазерным импульсом релятивистской интенсивности в продольном магнитном поле проведены численные расчёты для одной частицы. В случае распространения плоской волны в силу симметрии задачи начальное положение электрона не влияет на его конечную энергию, которая оказывается чувствительной к изменениям импульса, поскольку он определяет значение интеграла движения, тем самым оказывая влияние на выполнение резонансного условия.

Роль пространственной неоднородности магнитного поля рассмотрена для случая гауссова поперечного профиля. Помимо зависимости спектра электрона от начального положения электрона в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения лазерного импульса, возникает связь между характерной величиной магнитного поля и масштабом неоднородности, задающая оптимальные условия для эффективного ускорения.

При взаимодействии фокусированного лазерного импульса с покоящимся электроном в продольном магнитном поле также наблюдается эффективное поглощение энергии лазера заряженной частицей. Тем не менее, конечная энергия электрона существенно ниже, чем в случае плоской волны, поскольку точная синхронизация частот в данном режиме невозможна, несмотря на сохранение интеграла движения. Оценка вклада фазы Гои и кривизны волнового фронта в нарушение резонансного условия хорошо согласуется со сдвигом спектрального пика в область больших магнитных полей.

### *Список литературы*

1. Kolomenskii A.A. and Lebedev A.N. // JETP 1963. Vol. 17. P. 179.
2. Roberts C.S. and Buschbaum S.J. // Phys. Rev. 1964. Vol. 135. P. A381.
3. Salamin Y.I., Faisal F.H.M., Keitel C.H. // Phys. Rev. A. 2000. Vol. 62. P. 053809.
4. Salamin Y.I., Li J.-X., Galow B.J., Keitel C.H. // Opt. Express. 2015. Vol. 23. P. 17560.
5. Korneev Ph., Tikhonchuk V. and d'Humières E. // New J. Phys. 2017. Vol. 19. P. 033023.

Е.С. ГОНЧАРОВ<sup>1</sup>, А. М. КОТЕЛЬНИКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>2</sup>ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ ВО ВНУТРЕННИХ ПОЛОСТЯХ МИШЕНЕЙ ТИПА «ЛАЗЕРНЫЙ ПАРНИК» ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ГЕНЕРАЦИИ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ

Данная работа посвящена численному моделированию поведения потоков плазмы, образующихся при воздействии лазерного луча на мишень типа «Лазерный парник» и поглощении лазерного излучения во внутренней полости мишени. Представлены трехмерные расчеты задачи на структурированной и неструктурированной сетке.

E.S. GONCHAROV<sup>1</sup>, A.M. KOTELNIKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

## SIMULATION OF PLASMA FLOWS IN THE INTERNAL CAVITIES OF "LASER GREENHOUSE" TYPE TARGETS WITH DIFFERENT METHODS OF GENERATING A CALCULATED GRID

This work is devoted to numerical modeling of the behavior of plasma fluxes formed when a laser beam is introduced into a "Laser greenhouse" type target and laser radiation is absorbed in the inner cavity of the target. Three-dimensional calculations of the problem are presented depending on the method of generating a calculated grid.

Принципы действия лазерных мишеней, таких как «Лазерный парник» [1], Хольраум [2], мишень с обратной короной [3], основаны на воздействии лазерных пучков на мишень с поглощением лазерного излучения во внутренних полостях мишени. Одной из важных задач является исследование свойств неоднородных газодинамических плазменных потоков и тепловых полей, образующихся в результате поглощения энергии лазерных лучей, воздействующих на мишень через отверстия во внешней оболочке.

В настоящей работе посредством математического моделирования изучается лазерный нагрев материала во внутренней полости мишени «Лазерный парник». Выполнен ряд вычислительных экспериментов на основе радиационно-газодинамической модели, в которую включены отдельные уравнения баланса энергии электронной и ионной компонент плазмы. Для проведения расчетов использовался комплекс программных средств решения задач радиационной плазмодинамики MARPLE [4].

Выполнено моделирование воздействия лазера на мишень из полипропилена с плотностью  $1 \text{ г/см}^3$ , имеющую форму цилиндра с высотой  $500 \text{ мкм}$  и диаметром  $1000 \text{ мкм}$ . Условия задачи аналогичны [1], основное отличие состоит в том, что нами построен трехмерный вариант компьютерной модели мишени. Лазерный луч радиусом  $200 \text{ мкм}$  (меньше радиуса отверстия) был введен вдоль оси  $z$  в отверстие в верхнем слое мишени. Амплитуда лазерного импульса, длительность фронта импульса и длина волны составляли около  $4 \cdot 10^{13} \text{ Вт/см}^2$ ,  $3 \text{ нс}$  и  $1,06 \text{ мкм}$ , соответственно.

Результаты численного эксперимента согласуются с теоретическими оценками [1] состояния плазмы в «Лазерном парнике», при нагреве лазерным импульсом с интенсивностью порядка  $10^{13} \text{ Вт/см}^2$ . Расчеты продемонстрировали возникновение и распространение (в течение интервала времени не менее  $0,5 \text{ нс}$ ) сверхзвуковой волны электронной теплопроводности с температурой до  $3 \text{ кэВ}$  за фронтом волны. За время  $t \sim 0,5 \text{ нс}$  сверхзвуковая волна электронной теплопроводности распространяется на расстояние  $\sim 800 \text{ мкм}$ . Важным результатом данного расчета является относительно небольшая доля потерь поглощенной лазерной энергии, которая связана с вытеканием поглощающего вещества через отверстие, используемое для ввода лазерного излучения.

### Список литературы

1. С. Ю. Гуськов, В. Б. Розанов и Н. В. Змитренко, ЖЭТФ, 108, 548 (1995).
2. Дж. Наколс, Физика сегодня, 9, 25 (1982).
3. А. В. Бессараб, В. А. Гайдаш, Г. В. Долголева и др., ЖЭТФ, 102, 1800 (1992).
4. В. А. Гасилов, А. С. Болдарев, О. Г. Ольховская, Д. С. Бойков, Ю. С. Шарова, Н. О. Савенко, А. М. Котельников, "MARPLE: программное обеспечение для мультифизического моделирования в задачах сплошных сред", Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2023, 037, 40 с.

А.Р. ПОЛЕТАЕВА, И.П. ЦЫГВИНЦЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
ИИМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

## МОДИФИКАЦИЯ МНОГОГРУППОВОГО МЕТОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ О МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ПУЧКЕ

В данной работе формулируется модификация классического многогруппового подхода к решению уравнения переноса, позволяющая на одной группе получить решение, совпадающее с точным для моноэнергетического пучка частиц. На основе разработанного метода была проведена модификация РГД-кода 3DLINE и проведён расчёт динамики алюминиевой мишени конечной и бесконечной толщины под воздействием электронного пучка с энергией 200 кэВ интенсивностью  $2 \cdot 10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup>.

A.R. POLETAEVA, I.P. TSYGVINTSEV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

## MODIFICATION OF THE MULTIGROUP METHOD FOR THE MONOENERGETIC BEAM PROBLEM

In this paper, a modification of the classical multigroup method for the transport equation is formulated, which allows one to obtain a solution that coincides with the exact solution for a monoenergetic particle beam using a single group. Based on the developed method, the 3DLINE code was modified and the dynamics of an aluminum target of finite and infinite thickness under the influence of an electron beam with an energy of 200 keV and an intensity of  $2 \cdot 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> was calculated.

Наиболее распространённым подходом для моделирования взаимодействия лазерного излучения с интенсивностью до  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> с веществом является газодинамический. На более высоких интенсивностях применимость этого подхода начинается нарушаться ввиду ряда эффектов, в том числе включающих отклонение распределения частиц от максвелловского. Для лазерного излучения интенсивностью выше  $10^{16}$  Вт/см<sup>2</sup> существенным процессом является генерация высокоэнергичных (надтепловых) электронов, с энергиями на порядки превосходящими температуру тепловых электронов, баллистический перенос энергии которыми существенно влияет на динамику мишени [1]. Учёт этого процесса позволяет расширить применимость газодинамического приближения в область больших интенсивностей лазерного излучения.

В работе рассматривалась задача о нагреве плотной мишени моноэнергетическим пучком электронов. Численное решение этой задачи в классическом многогрупповом приближении [2] на равномерной спектральной сетке сходится к точному решению при большом ( $\sim 10^4$ ) числе энергетических групп и требует детальной пространственной сетки — заметные расхождения начинаются в области, где пробег электрона становится сравним с шагом сетки. Уширение и размытие пика поглощения приводит к заметным отличиям в динамике мишени: градиент температуры в направлении распространения пучка, определяющий интенсивность ударной волны, зависит от численных параметров расчёта (числа групп и шага сетки).

В работе разработана модификация многогруппового метода («гибридный метод»), основанная на одновременном отслеживании как числа частиц, так и потока энергии в каждой группе, позволяющая на малом числе групп добиться сходимости к точному решению. Данный метод позволяет провести расчёт поглощения энергии пучка в задаче с граничными условиями отражения без необходимости проводить трассировку отдельных электронов. Недостатком метода является ограничение на минимальное число учитываемых групп: оно должно быть не меньше, чем максимальное число отражений электронов от границ мишени. Достоинством — простота обобщения на случай многомерной задачи и возможность учёта рассеяния без использования метода Монте-Карло.

Проведено численное моделирование облучения твердотельной мишени из алюминия пучком электронов в RZ-геометрии с помощью гидродинамического программного комплекса 3DLINE [3] с разработанным программным модулем переноса электронов в различных приближениях. Продемонстрировано влияние метода учёта переноса электронов на распределение поглощаемой мощности и параметры возникающих ударных волн: в ударной волне, распространяющейся вдоль направления распространения электронного пучка, наблюдалось многократное отличие между амплитудами ударной волны в веществе мишени для двух методов, а для ударной волны, распространяющейся в перпендикулярном направлении от распространения пучка, различие оказалось не таким значительным.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 21-11-00102).

### Список литературы

1. Бакирова М. И. и др. Численное моделирование переноса энергии быстрыми электронами // Теория сжатия мишеней излучением длинноволновых лазеров, 1986. Труды ФИАН. Том 170. С. 73–92.
2. Lewis E. E., Miller W. F. Computational methods of neutron transport. – 1984.
3. Krukovskiy A. Y. 3D simulation of the impact made by a noncentral laser pulse on a spherical tin target / A. Y. Krukovskiy, V. G. Novikov, I. P. Tsygvintsev // Mathematical Models and Computer Simulations. 2017. V.9. P.48–59.

Е. Е. ПЕГАНОВ, С. В. ПОПРУЖЕНКО

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ГЕНЕРАЦИЯ СИЛЬНОГО КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ПЕТАВАТТНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ**

Передача углового момента от циркулярно поляризованного лазерного импульса плазменной мишени ведёт к генерации токов, создающих магнитное поле. При интенсивностях, превышающих  $10^{24}$  Вт/см<sup>2</sup> ведущим механизмом передачи углового момента является обратный эффект Фарадея, индуцированный радиационным трением. В случае интенсивности  $\sim 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup> существенно более важную роль играет пространственная структура поверхности мишени. Результаты моделирования при помощи PIC-кода SMILEI демонстрируют, что в обоих случаях амплитуда генерируемого магнитного поля может достигать нескольких Гига-Гаусс.

E. E. PEGANOV, S. V. POPRUZHENKO

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **GENERATION OF STRONG QUASI-STATIC MAGNETIC FIELDS IN A DENSE PLASMA TARGET IRRADIATED BY A PETAWATT LASER PULSE**

Angular momentum transfer between circularly polarized laser radiation and plasma targets leads to the excitation of currents, which generate magnetic fields. For intensities higher than  $10^{24}$  W/cm<sup>2</sup> the leading mechanism of angular momentum transfer is the inverse Faraday effect induced by radiation friction. In case of intensities  $\sim 10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> the space structure of the plasma surface plays a crucial role in this process. A simulation performed by the PIC-code SMILEI, shows that in both cases the magnetic field amplitude can be as high as several Giga-Gauss.

Обратный эффект Фарадея индуцированный радиационным трением, был предсказан теоретически в работе [1]: необратимая передача углового момента от циркулярно поляризованного лазерного импульса интенсивности  $\sim 10^{24}$  Вт/см<sup>2</sup> к плазменному слою высокой плотности приводит к возбуждению токов, генерирующих сильное магнитное поле с амплитудой до нескольких Гига-Гаусс (ГГц), направленное по или против оси распространения импульса, в зависимости от направления его поляризации. Такое магнитное поле имеет квазистационарный характер и сохраняется на временах свыше 100 фс, занимая при этом объём, близкий к фокальному объёму импульса. Циркулярно поляризованный лазерный импульс при таких интенсивностях проще всего получить путём скрещивания двух и более линейно поляризованных импульсов, распространяющихся под малым углом. Данная схема может быть реализована на разрабатываемых сейчас установках мультипетаваттного класса [2], конструкция которых основана на многопучковой конфигурации. Представленные в работе результаты PIC-моделирования с учётом силы радиационного трения, полученные с использованием пакета SMILEI [3], демонстрируют, что генерация магнитного поля напряженностью в несколько ГГц наблюдается даже при относительно больших  $\sim 15^\circ$  углах схождения пучков и относительной разности их амплитуд  $\sim 30\%$ . Эти результаты [4] подтверждают идею возможности достижения режима доминирования радиационного трения, маркером которого в данном случае является генерация сильных магнитных полей, при лазерно-плазменном взаимодействии с использованием нескольких пучков мощностью 10-20 ПВт каждый.

На уже существующих установках, включая Apollon и CoReIS [5,6], представляется возможным достичь интенсивности  $\sim 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>. Хотя при таких параметрах невозможно перейти в режим доминирования радиационного трения, и обратный эффект Фарадея наблюдаться не будет, генерация сильного магнитного поля остается возможной. При этом ключевую роль играет структура поверхности плазмы. В случае плотной мишени с цилиндрическим отверстием диаметром несколько большим ширины пучка возможна передача углового момента и возбуждение токов, генерирующих продольное магнитное поле. Результаты PIC-моделирования демонстрируют генерацию квазистационарного магнитного поля амплитудой в несколько ГГц при интенсивностях  $\sim 10^{23}$  Вт/см<sup>2</sup>.

### *Список литературы*

1. Liseykina T. V., Popruzhenko S. V., Macchi A. // *New Journal of Physics*. – 2016. – Т. 18. – №. 7. – С. 072001.
2. Khazanov E. et al. // *High Power Laser Science and Engineering*. – 2023. – Т. 11. – С. e78.
3. Derouillat J. et al. // *Computer Physics Communications*. – 2018. – Т. 222. – С. 351-373.
4. Liseykina T. V., Peganov E. E., Popruzhenko S. V. // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. – 2023. – Т. 50. – С. S700-S705.
5. Papadopoulos D. N. et al. // *High Power Laser Science and Engineering*. – 2016. – Т. 4. – С. e34.
6. Yoon J. W. et al. // *Optica*. – 2021. – Т. 8. – №. 5. – С. 630-635.

## МЕТОД РЕШЁТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА

Разработана численная схема решения уравнений Максвелла при наличии внешнего тока, по своему построению схожая с методами решёточных уравнений Больцмана (LBM), применяемыми для решения задач гидрогазодинамики. Схема принципиально отличается от методов конечных разностей (FDTD) и предоставляет ряд уникальных в сравнении с FDTD преимуществ.

A.V. BEREZIN<sup>1,2</sup>, V.D. LEVCHENKO<sup>2</sup>, A.M. FEDOTOV<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences), Moscow, Russia

## LATTICE MAXWELL METHOD

A numerical scheme for solving Maxwell's equations in the presence of an external current has been developed. The scheme construction is similar to the lattice Boltzmann methods (LBM) for fluid simulations. The scheme is fundamentally different from finite-difference methods (FDTD) and it provides a number of unique advantages compared to FDTD.

Методы решёточных уравнений Больцмана (LBM) [1] — это класс современных, активно развивающихся численных схем решения задач гидрогазодинамики. Они основаны на применении квадратурных формул для вычисления скоростных моментов кинетической функции распределения: плотности, скорости потока и температуры. При этом моменты выражаются как линейные формы в пространстве популяций — дискретных значений функции распределения. Эволюция популяций определяется системой дискретных уравнений Больцмана, удобной для численного решения. LBM отличается простотой реализации и большим потенциалом к модифицированию.

Методы LBM главным образом ассоциированы с задачами гидрогазодинамики, однако, в своей изначальной формулировке клеточных автоматов (LGCA) они применялись для решения широкого класса дифференциальных уравнений, имеющих вид законов сохранения. Сейчас LBM также используется при решении уравнений Максвелла [2,3].

На текущий момент стандартным способом численного решения задач электродинамики является конечно-разностный метод на сдвинутых сетках FDTD [4]. Несмотря на широкое распространение, схемы FDTD имеют общий ряд принципиальных проблем. Наличие частотной и анизотропной численных дисперсий моделируемых электромагнитных волн требует сравнительно большого разрешения временной и пространственной сеток (порядка 10-20 точек на длину волны). Нелокальный расчёт компонент электрического и магнитного полей может затруднять модификации алгоритма. В свою очередь методы LBM лишены многих из этих сложностей [3].

Исходя из метода, предложенного в работе [2], нами разработана схема решёточных уравнений Максвелла, позволяющая численно решать дифференциальные уравнения Максвелла при наличии произвольного внешнего тока. В основе метода лежит схожая с LBM схема, в которой эволюция электромагнитных полей  $\mathbf{E}(t, \mathbf{r})$ ,  $\mathbf{H}(t, \mathbf{r})$  определяется системой из  $m$  уравнений

$$f_i(t + \Delta t, \mathbf{r} + \mathbf{k}_i \Delta t) - f_i(t, \mathbf{r}) = -2(f_i(t, \mathbf{r}) - f_i^{\text{eq}}(t, \mathbf{r})) - 4\pi \Delta t \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{j}_i(t, \mathbf{r}), \quad i = 1, \dots, m,$$

где

$$f_i^{\text{eq}} = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{E} + \mathbf{h}_i \cdot \mathbf{H}, \quad \mathbf{E} = \sum_{i=1}^m \mathbf{e}_i f_i, \quad \mathbf{H} = \sum_{i=1}^m \mathbf{h}_i f_i,$$

$\Delta t$  — временной шаг сетки,  $\mathbf{k}_i$ ,  $\mathbf{e}_i$ ,  $\mathbf{h}_i$  — векторные коэффициенты,  $\mathbf{j}_i$  — множители, соответствующие внешнему току  $\mathbf{j}(t, \mathbf{r})$ .

При написании кода применялся локально-рекурсивный нелокально-асинхронный алгоритм (LRnLA) [5], позволяющий повысить эффективность вычислений.

### Список литературы

1. Timm K. et al. //Cham, Switzerland: Springer International Publishing AG. – 2016.
2. Mendoza M., Munoz J. D. //Physical Review E. – 2010. – Т. 82. – №. 5. – С. 056708.
3. Hauser A., Verhey J. L. //Physical Review E. – 2019. – Т. 99. – №. 3. – С. 033301.
4. Teixeira F. L. et al. //Nature Reviews Methods Primers. – 2023. – Т. 3. – №. 1. – С. 75.
5. Levchenko V., Perepelkina A. //Commun. Comput. Phys. – 2023. – Т. 33. – С. 214-244.

**Секция**  
**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ**  
**СИСТЕМ И КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ**

Руководитель секции – д.ф.-м.н. Борисюк Петр Викторович

Секретари секции – к.ф.-м.н., ассистент каф. №78  
Курельчук Ульяна Николаевна

Тел.: 8 (495) 788-56-99, доб. 9914  
E-mail: UNKurelchuk@mephi.ru

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНО-РАЗМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА В ДИОДАХ ШОТТКИ

Исследование фотодетекторов Шоттки с конфигурацией Ag/n-Si, включающих буферный слой нанокластеров тантала различных размеров и толщин. Структуры были оценены путем построения вольт-амперных характеристик и последующей аппроксимации с использованием уравнения диода Шоттки с учетом эффекта термоэлектронной эмиссии. Полученные данные позволяют оценить величину барьера Шоттки таких фотодетекторов и его зависимость от конфигурации танталового нанокластерного покрытия.

K.M. BALAKHNEV, D.V. BORTKO, V.A. SHILOV, O.S. VASILIEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## OPTIMIZATION OF OPTOELECTRONIC PROPERTIES IN NANO-SIZED TANTALUM CLUSTER COATINGS IN SCHOTTKY DIODES

The investigation of Schottky photodetectors with an Ag/n-Si configuration, incorporating a buffer layer of tantalum nanoclusters of various sizes and thicknesses, is presented. The structures were evaluated by constructing I-V characteristics and subsequent curve fitting using the Schottky diode equation with thermionic effect. The obtained data allow for the assessment of the Schottky barrier height of such photodetectors and its dependence on the configuration of the tantalum nanocluster coating.

В настоящее время кремниевые инфракрасные фотодетекторы исследуются как альтернатива более сложным и ресурсоёмким в изготовлении детекторам на компаундных полупроводниках. Одним из часто рассматриваемых решений являются детекторы работающие по принципу диодов Шоттки [1].

Эксперименты с золотыми частицами показали, что при диаметре гранул порядка 5-6 нм квантовые эффекты становятся преобладающими над размерными эффектами [2]. В связи с этим в данном исследовании мы предполагаем, что размер кластеров тантала может влиять на их зонную структуру.

В данной работе изучаются тонкие покрытия из нанокластеров тантала, полученные путём магнетронного распыления металлической мишени с последующей масс-фильтрацией, которые осаждаются на подложку из n-Si. Каждый образец в полученном наборе характеризуется своим фиксированным размером кластеров и толщиной покрытия, при этом диапазон исследуемых размеров составляет от 1.5 до 4.5 нм. После формирования танталовой нанокластерной плёнки, каждый образец покрывается слоем серебра методом электронно-лучевого испарения и термического осаждения, для формирования лучшего электрического контакта.

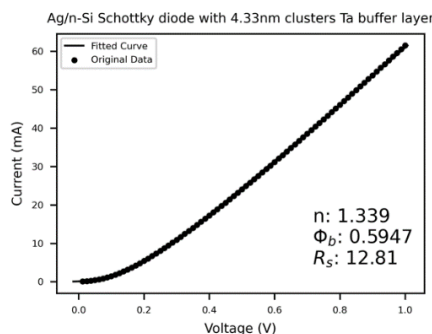


Рис.1 Темновая ВАХ диода Шоттки с определёнными при помощи аппроксимации параметрами (фактором идеальности, высотой барьера, последовательным сопротивлением)

Полученные образцы фотодетекторов Шоттки исследуются путем построения вольт-амперных характеристик и их последующей аппроксимации с использованием уравнения диода Шоттки с учетом эффекта термоэлектронной эмиссии. Данные о зависимости величины барьера Шоттки от параметров нанокластерного напыления могут быть использованы для построения модели зависимости свойств нанокластерных структур от их размерных характеристик, что в перспективе открывает возможности использования таких структур в фотовольтаических устройствах.

### Список литературы

1. H. -J. Syu, Y. -C. Huang, Z. -C. Su, R. -L. Sun and C. -F. Lin, "An Alternative to Compound Semiconductors Using a Si-Based IR Detector," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 69, no. 1, pp. 205-211, Jan. 2022, doi: 10.1109/TED.2021.3130566.
2. Riabenko, I., Shulga, S., Makarovskii N. A., & Beloshenko, K. (2023). Permittivity Model Selection Based on Size and Quantum-Size Effects in Gold Films. East European Journal of Physics, (3), 406-412. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-44>



П.В. БОРИСЮК, О.С. ВАСИЛЬЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **КОЭФФИЦИЕНТ СЕРОСТИ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТАЛЛОВ И ОКСИДОВ**

Проведено формирование и исследование тонких пленок оксидов металлов методом магнетронного осаждения и методом термического осаждения. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии был исследован химический состав полученных пленок, разработаны методики исследования коэффициента серости полученных пленок с помощью оптической и ИК спектроскопии. Показано, что среди исследуемых образцов у покрытия из материала Мо оказался наименьший коэффициент серости, из чего можно заключить, что его использование в качестве теплового излучателя/эмиттера будет являться наиболее эффективным, так как спектр его излучения будет смещен в более коротковолновую область по сравнению со спектрами излучения материалов, имеющих больший коэффициент серости.

P.V. BORISYUK, O.S. VASILIEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **THE GRAYNESS COEFFICIENT OF THIN FILMS OF METALS AND OXIDES**

The formation and study of thin films of metal oxides was carried out using magnetron deposition and thermal deposition methods. The chemical composition of the resulting films was studied using X-ray photoelectron spectroscopy, and methods were developed to study the gray coefficient of the resulting films using optical and IR spectroscopy. It was shown that among the studied samples, the Mo coating had the lowest gray coefficient, from which it can be concluded that its use as a thermal emitter/emitter will be the most effective, since its emission spectrum will be shifted to a shorter wavelength region compared to the emission spectra of materials with a higher gray coefficient.

На сегодняшний день задача создания материала с определенным спектральным коэффициентом излучения путем правильного сочетания химических и структурных свойств синтезированных материалов получила развитие в основном на основе эмпирических подходов, несмотря на растущий интерес к так называемым "селективным излучателям", то есть материалам, тепловое излучение которых в равновесном состоянии происходит в гораздо более узкой области спектра по сравнению с абсолютно черным телом при той же температуре.

Ряд исследований говорит о потенциальной эффективности нанесения тонких пленок металлов или оксидов металлов на поверхность излучающего тела, например поверхность капсулы радиоизотопного источника тепла, для формирования покрытия эффективно «сдвигающего» спектр излучения в область видимого диапазона длин волн, что позволяет повысить КПД термофотовольтаического преобразования. В настоящей работе представлены результаты формирования, исследования химического состава, оптических свойств материала на основе тонких пленок оксидов редкоземельных металлов. В качестве материалов, используемых для генерации и осаждения тонких пленок, в данной работе использовались следующие элементы: эрбий(Er), иттрий(Y), молибден (Mo), кислород (O<sub>2</sub>). Тонкие пленки были получены методом магнетронного осаждения и методом термического осаждения. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии был исследован химический состав полученных пленок. Показано, что излучательная способность пленок молибдена на кремнии (образцы Mo/Si) и кремния (Si) согласуется в оптическом и ИК диапазонах, согласуется со справочными данными [1]. Показано, что среди исследуемых образцов у покрытия из материала Мо оказался наименьший коэффициент серости, из чего можно заключить, что его использование в качестве теплового излучателя/эмиттера будет являться наиболее эффективным, так как спектр его излучения будет смещен в более коротковолновую область по сравнению со спектрами излучения материалов, имеющих больший коэффициент серости.

### *Список литературы*

1. D. Briggs / Surface Analysis by Auger and X-Ray Photoelectron Spectroscopy, IM Publications, Chichester, (2003).

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ОСАЖДЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ТАНТАЛА РАЗНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ МАГНЕТРОННОМ РАСПЫЛЕНИИ МИШЕНИ

Проведены серии экспериментов по измерению толщины тонких плёнок из наночастиц тантала различного размера (от 1.5 нм до 6.5 нм), напылённых на кварцевый кристалл методом магнетронного распыления мишени. Измерения проводились с помощью датчика массы, а затем на основе уравнения Зауэрбрея и известных параметров плёнки рассчитывалась её толщина. Получены зависимости толщины напыляемых плёнок из наночастиц тантала от диаметра частиц  $d$  и экспериментального коэффициента  $k$ , пропорционального объёму напыляемого вещества, который рассчитывается в режиме реального времени непосредственно во время напыления.

D.V. BORTKO, V.A. SHILOV, K.M. BALAKHNEV, O.S. VASILIEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia  
**DEPOSITION RATE OF TANTALUM NANOPARTICLES  
OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING**

Series of experiments were carried out to measure the thickness of thin films made of tantalum nanoparticles of various sizes (from 1.5 nm to 6.5 nm). The films were deposited on a quartz crystal by DC magnetron sputtering. The measurements were carried out using a quartz crystal microbalance, then the thickness of the films were derived from Sauerbrey equation and known film parameters. The dependences of the thickness of deposited tantalum nanoparticle films on the diameter  $d$  of the particles and the experimental coefficient  $k$ , which is proportional to the volume of deposited material and is calculated in real time directly during deposition, were obtained.

На сегодняшний день основной проблемой, связанной с напылением тонких плёнок, является недостаточная точность в определении напыляемой толщины. Это является серьёзным препятствием для создания покрытий и различных устройств, требующих точно заданных параметров для успешного функционирования.

В данной работе исследуется скорость осаждения наночастиц тантала разных размеров при магнетронном распылении танталовой мишени. Для этого проводятся серии экспериментов, в которых на кварцевый кристалл осаждаются плёнки различной толщины с фиксированным размером частиц по методике, описанной ранее в [1]. Каждая серия характеризуется собственным размером наночастиц от 1.5 нм до 6.5 нм. Площадь напыления плёнки во всех экспериментах фиксирована и ограничена маской, закреплённой сверху на кварце. Объём осаждаемого материала во время эксперимента контролируется через коэффициент  $k$ :

$$k = d^3 * \int_0^T I_{cl}(t) dt, \quad (1)$$

где  $d$  – это диаметр частиц (нм),  $I_{cl}(t)$  – кластерный ток (нА), пропорциональный количеству налетающих на подложку наночастиц в единицу времени,  $T$  – время эксперимента (мин).

В связи с невозможностью измерять толщину напыляемого вещества непосредственно в камере приготовления образцов, для снятия показаний кварцевый кристалл устанавливается в датчик массы, расположенный в отдельной вакуумной камере. Эта процедура проводится два раза в одном цикле эксперимента – перед напылением и после напыления плёнки. Так как показаниями датчика массы является частота, пересчёт в массу производится из уравнения Зауэрбрея (Sauerbrey equation) (2):

$$\Delta f = - \frac{2f_0^2}{A\sqrt{\rho_q\mu_q}} \Delta m, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  – изменение частоты (Гц),  $f_0$  – резонансная частота кристалла (Гц),  $A$  – площадь поверхности электрода (см<sup>2</sup>),  $\rho_q$  – плотность кварца (г/см<sup>3</sup>),  $\mu_q$  – модуль сдвига кварца (г·см<sup>-1</sup>·с<sup>-2</sup>),  $\Delta m$  – масса напылённого материала (г).

Толщина плёнки рассчитывается по формуле  $h = \Delta m / (\rho_{Ta} * S)$ , где  $\rho_{Ta}$  – плотность тантала (г/см<sup>3</sup>),  $S$  – площадь плёнки (см<sup>2</sup>).

Поскольку между осаждением наночастиц тантала на кварцевый кристалл и измерением частоты происходит вынос образца на атмосферу, необходимо также учитывать прирост массы за счёт образования оксидов тантала в получаемой из наночастиц плёнке. Для этого используется методика РФЭС, с помощью которой оценивается соотношение оксида тантала и металлического тантала после выноса образца на атмосферу и получения показаний с датчика массы.

Основной целью данной работы является построение зависимости толщины напыляемых плёнок из наночастиц тантала от диаметра частиц  $d$  и коэффициента  $k$ , который рассчитывается в режиме реального времени непосредственно во время напыления. Данная зависимость позволит построить калибровочные графики для дальнейшего использования при создании тонких покрытий с заданной толщиной.

*Список литературы*

1. БОРТКО Д. В. и др. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ // ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. – 2023. – Т. 14. – №. 2. – С. 194-201.

А.П. ВЯЛЫХ<sup>1,2</sup>, Г.С. БЕЛОТЕЛОВ<sup>1</sup>, А.В. СЕМЕНКО<sup>1</sup>, Д.В. СУТЫРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## МЕТОД ОЦЕНКИ КОЛИЧЕСТВА И ТЕМПЕРАТУРЫ АТОМОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОХЛАЖДЕНИИ В УСТРОЙСТВАХ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ

Рассмотрен метод оценки количества атомов в различных оптических ловушках, в том числе и магнитооптической, по сигналу флуоресценции. Представлена версия этого метода для оценки количества атомов в потоке, формируемом источником. Кроме того, описан метод оценки температуры облака охлаждённых атомов. Оценены неопределённости данных методов при их применении для исследований потока атомов и первичной магнитооптической ловушки на разрабатываемом оптическом стандарте частоты на основе холодных атомов иттербия. Проанализированы возможные причины, не позволившие достигнуть доплеровский предел при лазерном охлаждении.

A.P. VYALYKH<sup>1,2</sup>, G.S. BELOTELOV<sup>1</sup>, A.V. SEMENKO<sup>1</sup>, D.V. SUTYRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSUE "Russian metrological institute of technical physics and radioengineering", Mendeleevo, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## AN ESTIMATION METHOD OF THE ATOMIC NUMBER AND TEMPERATURE IN CASE OF LASER COOLING IN DEVICES BASED ON COLD ATOMS

An estimation method for the number of atoms in various optical traps, including magneto-optical ones, based on a fluorescence signal is considered. A version of this method is presented for estimating the number of atoms in the flow formed by the source. In addition, an estimation method of the cooled atomic cloud temperature is described. The uncertainties of these methods in their application to studies of the atomic flow and first-stage magneto-optical trap in the optical clock being developed on cold ytterbium atoms are estimated. The possible reasons that did not allow the Doppler limit to be reached during laser cooling are analyzed.

В экспериментах с холодными атомами, проводящимися по всему миру, полезная информация чаще всего получается из сигналов поглощения и флуоресценции атомов. Во многих случаях такой информацией является количество охлаждённых атомов и их температура, для оценки которых разработан ряд методов. Количество атомов может быть получено путём регистрации их флуоресценции [1], а также их поглощения по тени от облака холодных атомов, отбрасываемой на ПЗС-матрицу [2]. Температура чаще всего измеряется прямым методом [3], однако есть методы оценки и по снимкам облака атомов, сделанным ПЗС-камерой через фиксированный промежуток времени после отключения ловушки [4].

В работе рассмотрен простой метод оценки количества атомов по сигналу флуоресценции. Устройством его регистрации является ПЗС-камера, однако метод может применяться и с регистрирующими устройствами других моделей при проведении соответствующей градуировки. Как и другие методы, основанные на сборе сигнала флуоресценции, предлагаемый метод подходит для оценки малого числа атомов, в том числе и одиночных частиц, при выборе соответствующего детектора. Это позволяет применять метод не только для атомов, локализованных в ловушках, но и для атомов в потоке, где плотность частиц на порядки ниже.

Также в работе представлен метод оценки температуры облака холодных атомов, основанный на регистрации его снимков ПЗС-камерой одновременно с включениями детектирующего лазерного луча, формирующего сигнал флуоресценции. В отличие от популярного времяпролётного метода оценки температуры, предлагаемый метод не требует обязательного горизонтального расположения детектирующего луча, что само по себе является преимуществом в установках, конструкция которых не предусматривает такое расположение. При этом данное свойство имеет полезные следствия – применимость метода для ансамблей атомов, имеющих меньшее время жизни, чем необходимо для пролёта через детектирующий луч под действием гравитации (для облака атомов диаметром 1 мм минимальное время жизни можно оценить как 14 мс) и удобство регулировки времени разлёта перед детектированием.

Все методы были протестированы при использовании в разрабатываемом оптическом стандарте частоты на основе холодных атомов иттербия [5]. Кроме того, для них приведены оценки относительных неопределённостей. В ходе тестирования показано, что атомы <sup>171</sup>Yb в первичной МОЛ не охлаждаются до доплеровского предела. Проанализированы причины, препятствующие охлаждению.

Представленные методы оценки количества атомов и их температуры могут быть использованы для широкого круга исследований в области лазерного охлаждения.

### Список литературы

1. Hu Z., Kimble H. J. // Optics letters, 1994. Vol. 19, №. 22. P. 1888-1890.
2. Konstantinidis G. O., Pappa M., Wikström G. et al. // Central European Journal of Physics, 2012. Vol. 10, №. 5. P. 1054-1058.
3. Brzozowski T. M. et al. // Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics, 2002. Vol. 4, № 1. P. 62.
4. Wigley P. B., Everitt P. J., van den Hengel A. et al. // Scientific reports, 2016. Vol. 6, №. 1. P. 25890.
5. Белотелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н. // Альманах современной метрологии, 2019. № 4. С. 100-108.

А.А. ГОРОХИНА<sup>1,2</sup>, К.А. ЭСЕНОВ<sup>1,3</sup>, Д.В. СУТЫРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

Рассмотрена конструкция вакуумной камеры для уточнения сдвига частоты, вызванного излучением «черного тела». Проанализированы методы точного измерения температур в условиях вакуума и необходимое для этого оборудование. Кроме этого, исследовано черное покрытие экрана, равномерно распределяющее тепловое излучение от окружающей среды. Представлена модель распределения теплового излучения внутри вакуумной камеры. Оценены сдвиги частоты, вызванные излучением «черного тела».

A.A. GOROKHINA<sup>1,2</sup>, K.A. ESENOV<sup>1,3</sup>, D.V. SUTYRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSUE «Russian metrological institute of technical physics and radioengineering», Mendeleev, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research University of Electronic Technology, Zelenograd, Moscow, Russia

## DEVELOPMENT OF A VACUUM CHAMBER DESIGN FOR PRECISION MEASUREMENT OF THERMAL FREQUENCY SHIFT

The design of a vacuum chamber is considered to clarify the frequency shift caused by blackbody radiation. The methods of accurate temperature measurement under vacuum conditions and the necessary equipment for this are analyzed. In addition, the black coating of the screen was studied, which evenly distributes thermal radiation from the environment. A model of the distribution of thermal radiation inside a vacuum chamber is presented. Frequency shifts caused by blackbody radiation are estimated.

В оптических стандартах частоты (ОСЧ) необходимо учитывать различные сдвиги, влияющие на значения частоты «часового» перехода [1]. В частности, сдвиг от теплового излучения, который вносит большой вклад в общую сумму [2]. Для получения более конкретных значений частоты, необходимо данный сдвиг оценить с высокой точностью. Для этого требуется измерить температуру вакуумной камеры как внутри, так и снаружи, а также рассчитать вклад в сдвиг частоты от каждого объекта, окружающего облако атомов [3].

В работе рассмотрены методы и приборы, позволяющие оценить сдвиг частоты от теплового излучения. А именно различные температурные датчики, их преимущества и недостатки [4]. Также проведено сравнение характеристик измерителей температуры от различных производителей. И исследован материал поверхности экрана, позволяющий равномерно распределить тепловое излучение, в сравнении с аналогичным экраном без покрытия. Данный анализ необходим для эффективного проведения измерений температуры, следовательно для более точного подсчета сдвига частоты. По результатам были выбраны датчики термосопротивления РТ1000 с классом допуска 1/3В (1/3DIN).

Также в работе представлена модель вакуумной камеры для перебазируемого ОСЧ на холодных атомах иттербия [5]. Она подходит под необходимые измерения температуры, так как содержит достаточное количество свободных окон под вывод датчиков из внутренней части вакуума.

В среде моделирования COMSOL было получено распределение температуры в вакуумной камере для определения ожидаемых температур в различных точках камеры и телесного угла, необходимого для подсчета вклада каждого из элементов, окружающего облако атомов. По результатам моделирования выявлены самые горячие точки, в которых предполагается разместить датчики. Благодаря модели достаточно точно определен сдвиг частоты от теплового излучения, который был вычислен по формуле:  $\Delta\nu_{BRR} = -\frac{1}{2} \left( 831.9 \frac{V}{m} \right)^2 \left( \frac{T(K)}{300} \right)^4 \Delta\alpha_0 (1 + \eta)$  [2]. Полученная величина сдвига равна  $-3,00752 \times 10^{-15}$  Гц.

Представленные исследования используются при разработке компактной вакуумной камеры перебазируемого ОСЧ на нейтральных атомах иттербия [5].

### Список литературы

1. Gretchen K. Campbell, Andrew D Ludlow, Sebastian Blatt et al. // Metrologia, 2008 Vol. 45, № 5 P. 539-548.
2. Marianna S. Safronova et al. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2012. Vol. 59, № 3 P. 439-447.
3. Dezhi Xiong, Qiang Zhu et al. // Metrologia, 2021 Vol. 58, №3.
4. B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams et al. // Nature, 2014 Vol. 506, P. 71-75.
5. Белотелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н. // Альманах современной метрологии, 2019. № 4. С. 100-108.

Рассмотрены принципы работы квантового компьютера на ионной платформе. Рассмотрены оптические системы ионизации, охлаждения и детектирования ионов кальция-40. Продемонстрирован захват ионов в ловушку Пауля с последующей компенсацией микродвижений. Показана система стабилизации частоты TiSa лазера.

А.А. ДВУРЕЧЕНСКИЙ<sup>1</sup>, А.С. ШУЛЬМИНА<sup>1</sup>, Д.О. ТРЕГУБОВ<sup>2,3</sup>, А.А. ГОЛОВИЗИН<sup>2</sup>,  
Д.И. ПРОВОРЧЕНКО<sup>2</sup>, Д.А. МИШИН<sup>2</sup>, К.Ю. ХАБАРОВА<sup>2</sup>, В.Н. СОРОКИН<sup>2</sup>, Н.Н.  
КОЛАЧЕВСКИЙ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский квантовый центр, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА АТОМОВ ТУЛИЯ ДЛЯ ИМПЛАНТАЦИИ В КРИСТАЛЛИЧЕСКУЮ РЕШЕТКУ БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ

В рамках эксперимента по исследованию уширения часового перехода 1.14 мкм в атомах тулия, имплантированных в кристаллическую решётку благородных газов, был разработан и реализован источник атомов тулия для напыления на подложку.

А.А. DVURECHENSKIY<sup>1</sup>, А.С. SHULMINA<sup>1</sup>, D.O. TREGUBOV<sup>2,3</sup>, А.А. GOLOVIZIN<sup>2</sup>,  
D.I. PROVORCHENKO<sup>2</sup>, D.A. MISHIN<sup>2</sup>, К.Ю. KHABAROVA<sup>2</sup>, V.N. SOROKIN<sup>2</sup>,  
N.N. KOLACHEVSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian quantum centre, Moscow, Russia

<sup>2</sup>P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## ATOMIC SOURCE OF THULIUM FOR IMPLANTATION IN NOBLE GAS CRYSTAL FOR SPECTROSCOPY

As part of the 1.14  $\mu\text{m}$  transition spectroscopy experiments in thulium atoms implanted in solid, we developed and implemented an atomic source for implantation scheme of thulium atoms on the cold surface.

Часовой переход на длине волны 1.14 мкм в атоме тулия обладает чрезвычайно низкой чувствительностью к эффекту Штарка по сравнению с переходами в других нейтральных атомах [1]. Это свойство позволяет исследовать и использовать переход не только в атомах в оптической решетке, но и в атомах, имплантированных в кристаллическую решетку. Как правило в твёрдом теле происходят значительные уширения атомных переходов, но экспериментальные свидетельства аномально узкой линии перехода 1.14 мкм были продемонстрированы ранее в работах [2,3].

Изначально планировалось, что атомы тулия для имплантации в нашем эксперименте будут получаться в процессе абляции. Однако в ходе подготовки установки к сборке было выяснено, что данный способ является сложным. Поэтому был разработан новый источник атомов, основанный на нагреве твердого тулия. Главным возможным недостатком данного метода является повышенное тепловое излучение, вызванное температурой нагревательного элемента. Была произведена оценка влияния этого излучения на температуру криостата и непосредственно кристаллической решетки. Согласно проведенной оценке на результаты экспериментов источник влияния не оказывает.

Источник атомов тулия был изготовлен и успешно установлен в вакуумную камеру. После сборки отсутствие значимых протечек было подтверждено получаемым давлением на уровне  $10^{-6}$  мбар, достаточным для проведения экспериментов.

### Список литературы

1. Golovizin, A. et al. Inner-shell clock transition in atomic thulium with a small blackbody radiation shift. Nat. Commun. 10, 1–8 (2018).
2. Gaire, V., Raman, C. S. & Parker, C. V. Subnanometer optical linewidth of thulium atoms in rare-gas crystals. APS 99, (2019).
3. Ishikawa, K. et al. Laser spectroscopy of thulium atoms implanted in liquid and solid 4 He. (1997).

У.Н. КУРЕЛЬЧУК, О.С. ВАСИЛЬЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТАМ ЭЛЕКТРОННЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ D-МЕТАЛЛОВ И ИХ ОКСИДОВ**

Приведен обзор методик исследований в полуэмпирическом подходе электронных и оптических свойств нанокластеров тантала молибдена и их оксидов. Показана вычислительная эффективность метода сильной связи при моделировании электронной структуры нанокластеров от 3-4 нм, состоящих из тысяч частиц, по сравнению с методом функционала плотности и приближения МО-ЛКАО. Приведены исследования устойчивых форм оксидов  $Me_n O_x$  и сравнение с экспериментальными результатами.

U.N. KURELCHUK, O.S. VASILIEV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **SEMI-EMPIRICAL APPROACHES TO CALCULATIONS OF ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF D-METALS NANOCCLUSERS AND THEIR OXIDES**

A review of methods for studying the electronic and optical properties of tantalum-molybdenum nanoclusters and their oxides using a semi-empirical approach is provided. The computational efficiency of the strong coupling method in modeling the electronic structure of nanoclusters from 3-4 nm, consisting of thousands of particles, is shown in comparison with the approach of density functional theory and MO-LCAO. Studying stable forms of  $Me_n O_x$  oxides and comparison with experimental results are presented.

### *Список литературы*

1. Jin Hyun Chang et al 2019 J. Phys.: Condens. Matter 31 325901
2. C. S. Pedersen, J. H. Chang, Y. Li, N. Pryds, J. M. García Lastra. APL Mater. 8, 071108 (2020)
3. Yongling Guo et al Applied Surface Science, 396, 177-184 (2017)
4. J. Phys. Chem. A 2000, 104, 6, 1186–1195 (2000)

## ОЦЕНКА КВАНТОВОЙ ЗАПУТАННОСТИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЗАПУТАННЫХ МНОГОГРАННИКОВ И СВОП ТЕСТА

Метод многогранников требует высокой чистоты начальных состояний. Для оценки чистоты состояний был использован своп тест, адаптированный для проверки запутанных состояний. Оба метода имеют линейную вычислительную сложность, которая возрастает с увеличением размерности системы, и хорошо дополняют друг друга. В рамках исследования были изучены зависимости показателя чистоты состояний от различных видов шумов, вносимых тестом своп.

V.A. ORLOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## QUANTUM ENTANGLEMENT ESTIMATION USING THE METHOD OF ENTANGLEMENT POLYTOPES AND SWAP TEST

The method of entanglement polytopes requires high purity of the initial states. To assess the purity of states, was used a swap test, adapted to test entangled states. Both methods have linear computational complexity, which increases with the size of the system, and complement each other well. The dependence of the purity of states on various types of noise introduced by the swap test was studied.

Классификация запутанности важна с экспериментальной точки зрения тем, что состояния, принадлежащие к одному классу, подходят для выполнения одной и той же задачи. Реализация некоторых типов состояний может быть значительно проще и дешевле. В [1] предложен метод проверки и классификации запутанности, основанный на геометрии собственных значений и локальных измерениях подсистем, названный методом запутанных многогранников. Для применения метода требуется высокая чистота начальных состояний. Поэтому важно изучить влияние шума на чистоту состояний. Для этой цели выбран своп тест, модифицированный для проверки наличия запутанности [2]. Вычислительная сложность и своп теста, и метода запутанных многогранников растет линейно с увеличением размерности, что выгодно отличает их от популярного метода томографии квантовых состояний, вычислительная сложность которого растет экспоненциально с ростом размерности. В отличие от верификации запутанности, определение классов запутанности при использовании своп теста масштабируется хуже, чем при томографическом методе, в этом своп тест может быть выгодно дополнен методом запутанных многогранников.

В работе использовались однокубитовые и двухкубитовые вентили поворота  $R_{x,y,z}(\theta) = \exp\left(-\frac{i\theta\sigma_{x,y,z}}{2}\right)$  и  $R_{xx,yy,zz}(\theta) = \exp\left(-\frac{i\theta\sigma_{xx,yy,zz}}{2}\right)$ , часто берущиеся за первичные в экспериментах [3]. Влияние ошибок приготовления запутанных состояний на результаты своп теста было рассмотрено в [2], но влияние шумов, вносимых самим своп тестом, не было учтено. В данной работе проведена симуляция влияния ошибки измерения состояния, когерентного и некогерентного типа шумов на четырёхкубитовые запутанные состояния GHZ и W.

Метод запутанных многогранников накладывает серьёзные ограничения на значение чистоты [1]. Для него выполняется неравенство  $\sum_k |\lambda_{max}^{(k)}(\rho') - \lambda_{max}^{(k)}(\rho)| \leq \frac{N}{2}(1 - \sqrt{2p - 1})$ , где  $\lambda_{max}^{(k)}$  — это максимальное собственное значение  $k$ -той  $N$ -кубитовой редуцированной матрицы плотности чистого состояния  $\rho$  или зашумлённой версии  $\rho'$ ,  $p = \text{Tr}(\rho'^2)$  — показатель чистоты. Возникает проблема, что полученные собственные значения зашумлённого состояния могут лежать вне границ многогранника, что делает невозможной верификацию запутанности при определённых показателях чистоты.

Были получены зависимости показателя чистоты  $p$  от параметров, ответственных за шумы, для четырёхкубитовых состояний, а также определены значения показателя  $p$ , при которых становится невозможным верифицировать те или иные типы запутанных состояний. Например, сумма максимальных собственных значений для четырёхкубитовых состояний класса GHZ лежит в диапазоне 2 – 4, а для класса W в диапазоне 3 – 4. Тогда при значениях показателя чистоты  $p \leq \frac{5}{8}$  исследователи не смогут отличить представителя четырёхкубитового класса W от GHZ, а при  $p \leq \frac{1}{2}$  никогда достоверно не детектируют запутанность класса GHZ.

### Список литературы

4. *Walter M.* [et al.] Entanglement polytopes: multiparticle entanglement from single-particle information //Science. – 2013. – Т. 340. – №. 6137. – С. 1205-1208.
5. *Foulds S.* [et al.] The controlled SWAP test for determining quantum entanglement //Quantum Science and Technology. – 2021. – Т. 6. – №. 3. – С. 035002.
6. *Aksenov M. A.* [et al.] Realizing quantum gates with optically addressable Yb+ 171 ion qudits //Physical Review A. – 2023. – Т. 107. – №. 5. – С. 052612.

И.Л.ГЛУХОВ<sup>1</sup>, А.А.КАМЕНСКИЙ<sup>1</sup>, А.С. КОРНЕВ<sup>1</sup>. Н.Л. МАНАКОВ<sup>1</sup>, В.Д.ОВСЯННИКОВ<sup>1,2</sup>,  
В.Г. ПАЛЬЧИКОВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет 394018, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное унитарное предприятие «ВНИИФТРИ» 141570, Московская область, Менделеево,  
Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Россия

## ПРЕЦИЗИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ РИДБЕРГОВСКИХ СВЧ-ПЕРЕХОДОВ В АТОМАХ: НОВЫЕ МЕТОДЫ В КВАНТОВОЙ МЕТРОЛОГИИ

Результаты выполненных в настоящей работе расчетов частот и амплитуд радиационных переходов между ридберговскими состояниями атомов предоставляют новую информацию о спектрах ридберговских состояний этих атомов. Эта информация может быть полезна для будущего использования ридберговских атомов не только в метрологии СВЧ излучения, но и для создания новых информационно-коммуникационных систем на основе источников микрометрового, миллиметрового и сантиметрового излучения, работающих на частотах радиационных переходов между ридберговскими состояниями атомов.

I.L.GLUKHOV<sup>1</sup>, A.A.KAMENSKY<sup>1</sup>, A.S. KORNEV<sup>1</sup>. N.L. MANAKOV<sup>1</sup>, V.D.OVSYANNIKOV<sup>1,2</sup>,  
V.G. PALCHIKOV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University 394018, Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Federal State Unitary Enterprise "VNIIFTRI" 141570, Moscow region, Mendeleev, Russia

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI  
115409, Moscow, Russia

## PRECISION SPECTROSCOPY OF RYDBERG MICROWAVE TRANSITIONS IN ATOMS: NEW METHODS IN QUANTUM METROLOGY

The results of calculations of the frequencies and amplitudes of radiative transitions between the Rydberg states of atoms performed in this work provide new information about the spectra of the Rydberg states of these atoms. This information may be useful for the future use of Rydberg atoms not only in the metrology of microwave radiation, but also for the creation of new information and communication systems based on sources of micrometer, millimeter and centimeter radiation operating at the frequencies of radiative transitions between Rydberg states of atoms.

Прецизионное измерение напряженности электрических полей сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения на основе измерения спектроскопических характеристик радиационных переходов между ридберговскими состояниями атомов с большими значениями главных квантовых чисел  $n$  в настоящее время становится подробно изученной теоретически и детально разработанной экспериментально областью исследований в современной атомной спектроскопии и квантовой метрологии. В этой же СВЧ спектральной области локализуются частоты радиационных переходов между ридберговскими состояниями атомов. Вместе с частотами радиационных переходов быстро убывают пропорционально  $n^{-\alpha}$ , где  $\alpha \geq 3$ , и ширины ридберговских уровней энергии. Благодаря практически бесконечному набору ридберговских состояний в любом атоме с отчетливо выраженными сериями одноэлектронных связанных состояний, всегда существует возможность найти такие ридберговские уровни, частота перехода между которыми строго совпадает с заданной частотой СВЧ излучения. Под действием резонансного поля, происходит расщепление ридберговских уровней, пропорциональное частоте Раби  $W = FR$  – произведению напряженности СВЧ электрического поля  $F$  и матричного элемента  $R$  радиационного перехода [1-4]. Такое расщепление, трансформируемое в расщепление резонанса для эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) сильно поглощаемого излучения, зондирующего резонансный переход из основного в первое возбужденное состояние, может быть измерено с большой точностью. В настоящей работе представлены новые результаты расчетов частот радиационных переходов между ридберговскими состояниями атомов, направленных на разработку новых методов метрологии полей радиочастотного и микроволнового диапазонов.

Список литературы

- [1]. Стельмашенко Е.Ф., Клезович О.А., Барышев В.Н., и др. Оптика и спектроскопия, **128**, 1063 (2020) [Opt. Spectrosc., **128**, 1067 (2020)].
- [2]. V. D. Ovsyannikov, V. G. Pal'chikov, I. L. Glukhov, *Photonics* **9**, 635 (2022).
- [3]. И.Л. Глухов, А.А. Каменский, В.Д. Овсянников, В.Г. Пальчиков. *ЖЭТФ*, **164**, 193 (2023).
- [4]. I.L. Glukhov, A.A. Kamenski, V.D. Ovsyannikov, V.G. Palchikov. *Photonics* **10**, 1153 (2023).



## **ПОДГОТОВКА АТОМОВ ТУЛИЯ В НАЧАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЯХ ЧАСОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ОСНОВНОМ КОЛЕБАТЕЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕХОДА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 506.2 НМ**

В работе разрабатывается новый протокол лазерного охлаждения атомов тулия в оптической решётке и их подготовка в начальных состояниях часового перехода с использованием перехода на длине волны 506.2 нм. Для этого экспериментально измеряются компоненты динамической поляризуемости верхнего уровня охлаждающего перехода, реализуется оптическая накачка атомов тулия на крайний магнитный подуровень, осуществляется их охлаждение вдоль радиальной и аксиальной оси оптической решётки и перекачка их на центральный магнитный подуровень для дальнейшего опроса часового перехода.

D.I. PROVORCHENKO, D.A. MISHIN, D.O. TREGUBOV, N.N. KOLACHEVSKY, A.A. GOLOVIZIN

*P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia*

## **THULIUM ATOMS PREPARATION AT THE INITIAL STATES OF THE CLOCK TRANSITION AT THE LOWEST VIBRATIONAL SUBSTATE WITHIN THE OPTICAL LATTICE USING THE TRANSITION AT 506.2 NM**

In this work we present the new protocol of thulium atoms laser cooling within the optical lattice and their following preparation at the initial states of the clock transition. For this we measured the components of dynamic polarizability of excited level of the cooling transition, then we demonstrate the optical pumping to the extreme magnetic sublevel, performed laser cooling through both radial and axial directions of the optical lattice and the repumping atoms to the central magnetic sublevels.

Оптические часы занимают выделенное место среди прочих метрологических устройств так как являются наиболее точным измерительным прибором, доступным на данный момент. Лучшие устройства такого типа достигли уровня относительной неточности на уровне  $10^{-18}$  и такого же уровня нестабильности при времени усреднения порядка одного часа, что позволяет применять их для решения как фундаментальных, так и прикладных задач [1]. Некоторые прикладные задачи требуют функционирования оптических часов за пределами лаборатории, а значит приводит к необходимости создания компактных, транспортируемых устройств [2].

Одной из перспективных платформ для транспортируемых оптических часов являются ансамбли холодных атомов тулия. Часовой переход в атомах тулия обладает рекордно низкой чувствительностью к большинству внешних возмущений [3]. Оставшиеся сдвиги частоты удается подавить, используя протокол опроса на основе «синтетической частоты», что делает систематический сдвиг частоты часового перехода в атомах тулия рекордно низким [4]. Всё это позволяет серьёзно упростить конструкцию разрабатываемого устройства, что положительно сказывается на его стоимости и массогабаритных характеристиках.

Необходимым шагом для создания оптических часов на основе нейтральных атомов является исследование сдвигов частоты, вызываемых излучением оптической решётки. Создание решётки на «магической» длине волны позволяет подавить сдвиг частоты, возникающий из-за электро-дипольной поляризуемости, но для достижения неточности на уровне  $10^{-18}$  необходима характеристика сдвигов, вызываемых поляризуемостями высоких порядков (электро-квадрупольной и магнито-дипольной, а также гиперполяризуемостями). Эти сдвиги, помимо прочего, зависят от движения атомов в оптической решётке, и, как следствие, от их температуры, а значит для их характеристики с приемлемой точностью требуется глубокое охлаждение атомов.

Текущий протокол подготовки атомов тулия в начальных состояниях часовых переходов позволяет получить  $10^3$ - $10^4$  атомов при температуре порядка 3 мкК, что соответствует среднему колебательному числу  $n_z \approx 1$ . Это позволяет получить предварительные оценки поляризуемостей высоких порядков, однако для точного их измерения требуется улучшение характеристик. В данной работе мы предлагаем новый протокол подготовки начальных состояний часовых переходов на основе использования перехода на длине волны 506.2 нм. Для этого мы измерили динамическую поляризуемость верхнего уровня этого перехода, реализовали оптическую накачку на крайний магнитный подуровень, охладили атомы вдоль аксиального и радиального направления оптической решётки и осуществили перекачку атомов на центральный магнитный подуровень с использованием радиочастотных переходов между зеемановскими подуровнями. Это позволяет работать с большим числом атомов на центральном магнитном подуровне с температурой  $T_z \approx 1$  мкК и средним колебательным числом  $n_z \leq 0.1$ .

### *Список литературы*

1. Ludlow, Andrew D., et al. Reviews of Modern Physics 87.2 (2015): 637.
2. Ohmae, Noriaki, et al. Advanced Quantum Technologies 4.8 (2021): 2100015.
3. Golovizin, A., et al. Nature communications 10.1 (2019): 1724.
4. Golovizin, A., et al. Nature communications 12.1 (2021): 5171.

А.В. СЕМЕНКО<sup>1</sup>, А.П. ВЯЛЫХ<sup>1,2</sup>, Д.А. ПАРЁХИН<sup>1</sup>, Д.В. СУТЫРИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», Менделеево, Московская область, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОКОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ ЧАСТОТЫ

Представлен новый вариант системы управления для использования в переносимых и лабораторных оптических стандартах частоты. В качестве основы для аппаратной части системы управления использован микроконтроллер STM32. Программа управления с графическим интерфейсом реализована на языке Python. Проведен ряд экспериментов, доказывающих работоспособность данной системы управления. С ее использованием удалось получить первично охлажденное облако атомов <sup>171</sup>Yb температурой 22 мК и вторично охлажденное облако атомов <sup>87</sup>Sr температурой 14 мК. Данные результаты совпадают с полученными с использованием других систем управления. Также программа управления позволяет производить оценку основных систематических частотных сдвигов. Ведутся работы по реализации автоматического расчета данных сдвигов.

A. V. SEMENKO<sup>1</sup>, A. P. VYALYKH<sup>1,2</sup>, D. A. PARYOHIN<sup>1</sup>, D. V. SUTYRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSUE “Russian metrological institute of technical physics and radioengineering”, Mendeleevo, Moscow region, Russia

<sup>2</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## MICROCONTROLLER-BASED CONTROL SYSTEM FOR OPTICAL CLOCKS

A new version of the control system for transportable and laboratory optical clocks is presented. The STM32 microcontroller used as the basis for the control system hardware. The GUI control software written in Python is implemented. Number of experiments proved the performance of this control system. It was possible to obtain a first-stage cooled <sup>171</sup>Yb atomic cloud with a temperature of 22 mK and a second-stage cooled <sup>87</sup>Sr atomic cloud with a temperature of 14 mK. These results coincide with obtained earlier. The control software allows the estimation of the optical clock main frequency shifts. The automatic calculation of these shifts is underway.

Система управления (СУ) является важнейшей частью любого современного оптического стандарта частоты (ОСЧ). Наиболее популярным решением для реализации СУ является комбинация Real-Time системы National Instruments (NI) и программы управления, написанной на графическом языке программирования LabVIEW, однако у него есть некоторые существенные недостатки (высокая стоимость, сложности с масштабированием и т.д.), вынуждающие реализовывать другие варианты СУ.

Примерами других вариантов СУ являются работы [1,2], в которых используются платы FPGA и одноплатный компьютер BeagleBone Black. Одним из наиболее перспективных является использование в качестве основы для аппаратной части СУ микроконтроллера (МК) в связи с низкой стоимостью и компактными размерами. В данной работе представлена СУ на основе микроконтроллера STM32F407 и программы управления с графическим интерфейсом, написанной на языке Python. В разработанной СУ предусмотрено 24 выхода для генерации управляющих П-импульсов (TTL-импульсов), 10 аналоговых выходов, сигнал на которых формируется внешним и внутренним ЦАП, и возможность подключения DDS-модулей, которая реализуется в данный момент.

Связь между программой управления и аппаратной частью реализована через TTL-UART конвертор. Информация о выполнении цикла измерений зашифровывается в виде массивов, которые передаются в память МК. Программу управления можно использовать и с другими системами генерации управляющих импульсов, например, с программируемым генератором частоты [3].

Несмотря на низкую скорость вычислений по сравнению с платами FPGA и системой NI, возможностей МК достаточно для управления ОСЧ, что было показано в нескольких экспериментах. В первом эксперименте оценивалась температура облака холодных атомов <sup>174</sup>Yb в первичной магнито-оптической ловушке переносимого ОСЧ [4]. Она составила ~22 мК, что совпало с результатом, полученным ранее с использованием генераторов [3]. Во втором эксперименте данная СУ была подключена к <sup>87</sup>Sr стандарту частоты, и с ее использованием было получено облако вторично охлажденных атомов температурой ~12 мК. Полученная температура совпала с той, до которой облако атомов охлаждается при использовании системы NI (~14 мК). Также в этом эксперименте с использованием разработанной СУ атомы, охлажденные до такой температуры, были загружены в оптическую решетку.

Помимо этого, при использовании данной СУ была уточнена неисключенная систематическая погрешность (НСП) основных систематических сдвигов в Sr ОСЧ (сдвиг излучения черного тела, динамический штарковский сдвиг и зеемановский сдвиг). Уточненная НСП <sup>87</sup>Sr ОСЧ составила ~2,5e-17.

Для СУ на основе МК предусмотрены автоматический сбор и обработка информации об условиях проведения эксперимента для дальнейшего вычисления бюджета неопределенности ОСЧ. В настоящий момент производится реализация данного функционала.

### Список литературы

1. A. Trenkwalder, M. Zaccanti, N. Poli, // Review of Scientific Instruments, 2021. Vol. 92, № 10.
2. Golovizin A. A. et al. // Instruments and Experimental Techniques, 2022. Vol. 65, № 6, P. 896-902.
3. А. П. Вялых, П. И. Скакуненко, М. В. Шишова и др. // Письма в ЖЭТФ. 2024. Vol. 119, № 4, С. 273–282
4. Белтелов Г.С., Сутырин Д.В., Слюсарев С.Н. // Альманах современной метрологии, 2019. № 4. С. 100-108.

## ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ЧАСОВОГО ПЕРЕХОДА В ИОНЕ SR88+ В КВАДРУПОЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ ПАУЛЯ ЛИНЕЙНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В данной работе демонстрируется система охлаждения и управления лазерами, а также проведение спектроскопии часового перехода. Были получены спектры изменения сигнала люминесценции от частоты часового лазера на длине волны 674 нм. Ширина линии составляет 20 МГц.

К.К. TRICHEV, P.V. BORISYUK, P.A. CHEREPANOV, D. O. TREGUBOV  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## DETECTION OF THE CLOCK TRANSITION IN THE SR88+ ION IN A QUADRUPOLE PAUL TRAP OF LINEAR CONFIGURATION

This work demonstrates the laser cooling and control system, as well as clock transition spectroscopy. Spectra of changes in the luminescence signal from the frequency of a clock laser at a wavelength of 674 nm were obtained. The line width is 20 MHz.

Для возбуждения часового перехода были сбиты лазерные пучки охлаждающего и часового перехода. Все используемые лазеры были стабилизированы с помощью PID-регуляции.

Была проведена спектроскопия охлаждающего перехода на длине волны 422 нм при разных амплитудах ВЧ ловушки (рис.1.). Данный эксперимент необходим для того, чтобы определить оптимальную частоту «охлаждающего» лазера при каждой амплитуде ВЧ, поскольку высокочастотное поле приводит к нагреву частиц, из-за чего предельная температура охлаждения изменяется. В результате была определена резонансная частота при минимальной амплитуде переменного поля, приводящая к оптимальному охлаждению. Благодаря этому результату получилось оптимизировать способ получения ионного облака для проведения спектроскопии часового перехода.

Взаимодействуя часовым лазером на длине волны 674 нм сигнал люминесценции на длине волны 422 нм детектируемый на ПЗС-камере уменьшается в зависимости от частоты (рис.2.). Резонансная частота перехода составляет 444778950 МГц, при соответствующем уменьшении сигнала люминесценции на 50%. Была определена температура ионов. Основным вкладом в ошибку определения абсолютной частоты является погрешность измерителя длин волн.

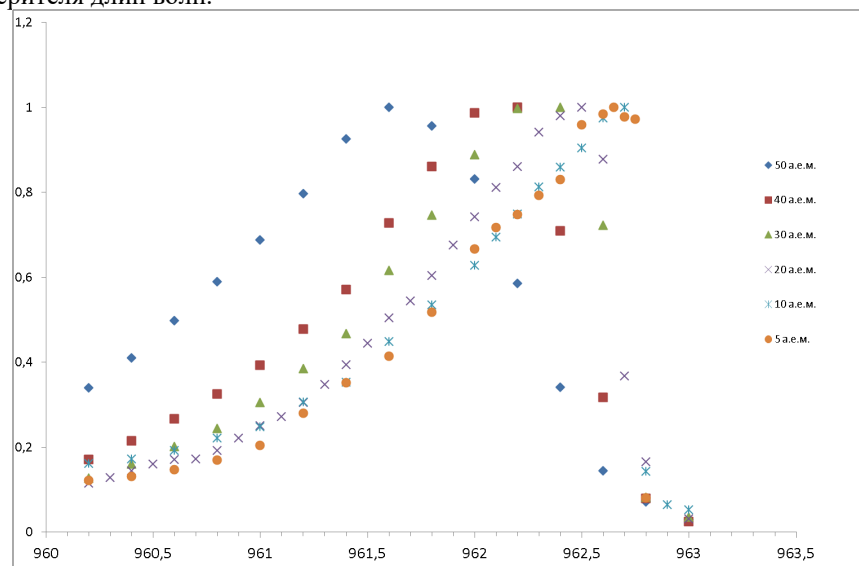


Рис. 1. Зависимость интенсивности флуоресценции облака ионов в зависимости от частоты излучения «охлаждающего» лазера при различных амплитудах переменной составляющей ВЧ поля.

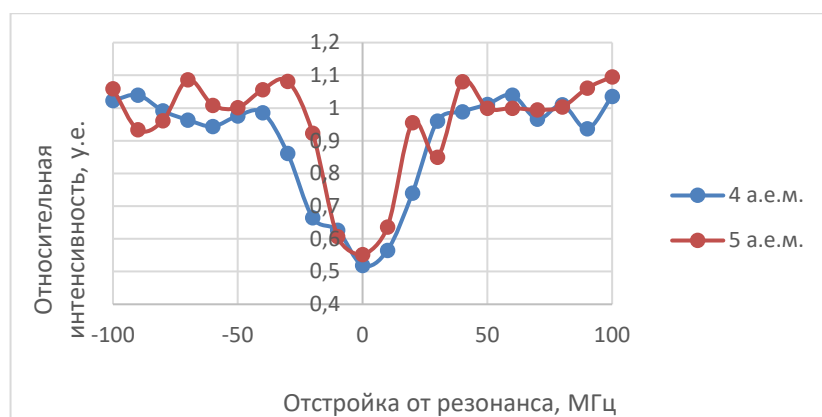


Рис. 2. Спектр флуоресценции облака ионов в зависимости от частоты часового лазера.

*Список литературы*

1. Bruzewicz C. D. et al. Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges //Applied Physics Reviews. – 2019. – Т. 6. – №. 2. – С. 021314.
2. Cirac J. I., Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions //Physical review letters. – 1995. – Т. 74. – №. 20. – С. 4091.
3. Arute F. et al. Observation of separated dynamics of charge and spin in the fermi-hubbard model //arXiv preprint arXiv:2010.07965. – 2020.

## ЭВОЛЮЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ ТАНТАЛА И ОКСИДОВ ТАНТАЛА РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРОВ

В данной работе были получены образцы нанокластеров металлического тантала и Ta/TaO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. По результатам РФЭС анализа восстановлены следующие электронные характеристики: работа выхода ансамбля наночастиц, плотность электронных состояний вблизи уровня Ферми.

V.A. SHILOV, D.V. BORTKO, K.M. BALAKHNEV, P.V. BORISUK, O.S. VASILIEV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## EVOLUTION OF ELECTRONIC PROPERTIES OF TANTALUM NANOCLUSTERS AND TANTALUM OXIDES OF DIFFERENT SIZES

Samples of metal tantalum nanoclusters, as well as Ta/TaO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nanoclusters were obtained. Based on the results of XPS spectroscopy, the following electronic characteristics were reconstructed: the work function of an ensemble of nanoparticles, the density of electronic states near the Fermi level.

Представлены результаты исследования электронных свойств системы на основе нанокластеров тантала и его оксидов на поверхности монокристаллического кремния. Данная система потенциально позволяет эффективно поглощать и преобразовывать широкий спектр оптического излучения, включая ближний ИК-диапазон, с целью последующего создания термофотовольтаического материала на основе наноструктурированной пленки. Монодисперсные нанокластерные плёнки (с отклонением по размерам нанокластеров не более 2%) были получены при помощи кластерного источника Nanogen-50 (Mantis Deposition Ltd.), установленного в сверхвысоковакуумном комплексе анализа поверхности Omicron, методом магнетронного распыления. Фильтрация по размерам перед осаждением на поверхность подложки производилась при помощи квадрупольного масс-фильтра. Диаметр осаждаемых на кремний нанокластеров составлял от 1 нм до 7 нм. В качестве подложки использовался кремний n-типа проводимости (100 КЭФ) с напылённым снизу алюминиевым щелевым контактом. После напыления нанокластеров образцы in-situ (без выноса на атмосферу) перемещались в камеру анализа, где проводился анализ методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). По результатам РФЭС анализа восстановлены следующие электронные характеристики: работа выхода ансамбля наночастиц, плотность электронных состояний вблизи уровня Ферми для наночастиц различного размера как для нанокластеров металлического тантала (рис. 1), так и для core-shell нанокластеров Ta/TaO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (рис. 2). По характеру угловых зависимостей соотношений пиков дублета Ta4f и кислорода была установлена однородность состава тонкой нанокластерной плёнки. Для нанокластеров металлического тантала диаметром  $d < 3$  нм наблюдался эффект размерного сдвига энергии связи.

На основе полученной серии образцов были подготовлены структуры типа диодов Шоттки, в которых в качестве одного из контактов участвовал тонкий слой нанокластеров, покрытый слоем серебра. Для полученной серии образцов нанокластеров Ta и Ta/TaO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> был обнаружен оптический отклик на длине волны  $\lambda=1550$  нм.

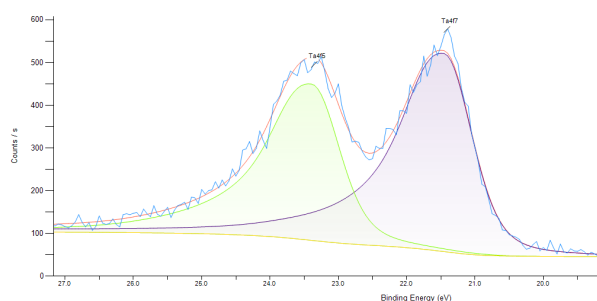


Рис. 1. РФЭС спектр нанокластеров металлического Ta

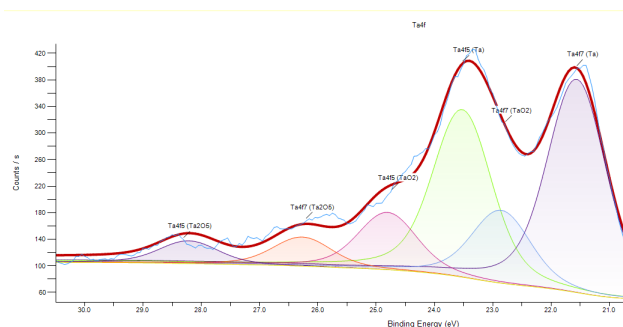


Рис. 2. РФЭС спектр нанокластеров Ta/TaO<sub>2</sub>/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОДЕТЕКТОРОВ С НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ТАНТАЛА В ВИДИМОМ И ИК ДИАПАЗОНАХ

Исследование фотодетекторов с конфигурацией Ag/Ta/n-Si, включающих буферный слой нанокластеров тантала различных размеров и толщин. В данной работе изучалась зависимость чувствительности фотодетекторов от характеристик буферного слоя нанокластеров Ta, таких как толщина слоя и диаметр нанокластеров. Исследования чувствительности производились для длин волн 405, 532, 980 и 1088 нм.

## MEASUREMENT OF PHOTODETECTOR SENSITIVITY WITH NANOSTRUCTURED TANTALUM COATINGS IN VISIBLE AND IR RANGES

Investigation of photodetectors with Ag/Ta/n-Si configuration, incorporating a buffer layer of tantalum nanoclusters of various sizes and thicknesses. This study examines the sensitivity dependence of photodetectors on the characteristics of the tantalum nanocluster buffer layer, such as layer thickness and nanocluster diameter. Sensitivity measurements were performed for wavelengths of 405, 532, 980, and 1088 nm.

В данной работе изучаются тонкие покрытия из нанокластеров тантала, полученные путём магнетронного распыления металлической мишени с последующей масс-фильтрацией, которые осаждаются на подложку из n-Si. Каждый образец в полученном наборе характеризуется своим фиксированным размером кластеров и толщиной покрытия, при этом диапазон исследуемых размеров составляет от 1.5 до 4.5 нм. После формирования танталовой нанокластерной плёнки, каждый образец покрывается слоем серебра методом электронно-лучевого испарения, для предотвращения образования оксидной плёнки на тантале. Затем каждый образец покрывается более толстым слоем серебра путём термического осаждения для формирования лучшего электрического контакта.

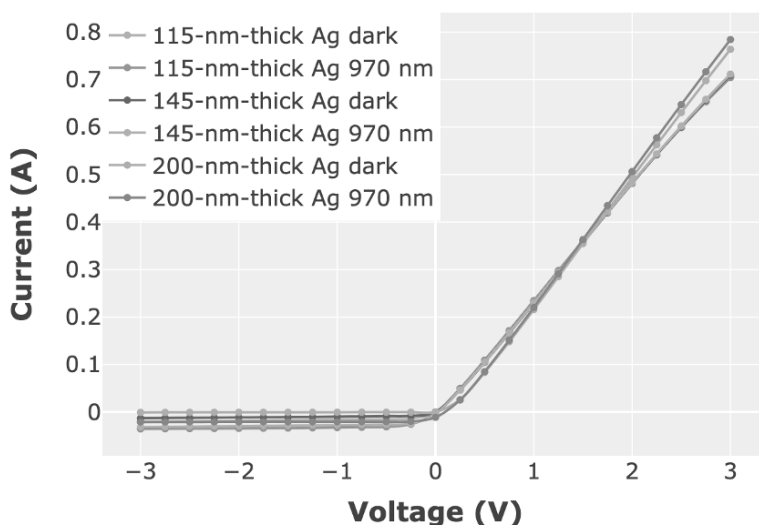


Рис. 1 I-V кривые диодов Шоттки толщиной 115, 150 и 200 нм, измеренные в темноте и при непрерывном лазерном освещении с длиной волны 970 нм

Полученные образцы фотодетекторов исследуются путем построения темновых вольт-амперных характеристик, а затем построения ВАХ при освещении лазерами с длинами волн 405, 532, 980 и 1088 нм. Таким образом, при сравнении полученных данных о чувствительности фотодетекторов с использованием наноструктурированных плёнок Ta с аналогичными данными для фотодетекторов без таких покрытий показывают, что наличие наноструктурированных покрытий слабо влияют на чувствительность фотодетекторов в исследуемых диапазонах длин волн.

**Секция  
ОБРАЗОВАНИЕ В ИНЖЕНЕРНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ:  
ВЫЗОВЫ, МЕТОДИКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

Председатель – к.ф.-м.н., зам. директора института ЛаПлаз Рябов  
секции Павел Николаевич

Сопредседатель – и.о. директора УНЦ «Квантовый инжиниринг»  
Ляхова Яна Сергеевна

Секретарь – ассистент кафедры «Прикладная математика»  
секции Кан Кристина

Тел.: +7 985 832 24 22

E-mail: [kristina.v.kan@gmail.com](mailto:kristina.v.kan@gmail.com)

## ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ В ОБРАЗОВАНИИ

В данной статье раскрывается суть технологий виртуальной реальности. На примере интерферометра Маха-Цендера раскрывается суть допущений реалистичности происходящего в виртуальной реальности, которые имеют место быть и могут быть применены для упрощения взаимодействия пользователя с установками без потери качества образовательного процесса.

K.F. BORODIN, D.A. SINITSYA, A.N. ELAGINA, M.S. TOLSTOV  
*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

## VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES IN EDUCATION

This article reveals the essence of virtual reality technologies. Using the example of the Mach-Zehnder interferometer, the essence of the assumptions of realism of what is happening in virtual reality is revealed, which take place and can be applied to simplify user interaction with installations without losing the quality of the educational process.

В наши дни такие понятия, как виртуальная, дополненная или смешанная реальность, стали привычными почти для любого человека, хоть немного знакомого с компьютерными технологиями.

Технологии виртуальной реальности нашли широкое применение не только в индустрии развлечений, например, использование технологий виртуальной реальности в машиностроении позволяет сократить время и средства на разработку и производство новой продукции за счет выявления конструктивных дефектов на ранних стадиях проектирования, также позволяет оценить эргономику и дизайн продукции до производства макета или опытного образца[1].

Технологии виртуальной реальности не остались без внимания и в сфере образования. Например, студенту технической специальности будет плюсом понимать, как устроены и как работают токарный, фрезерный или другие металлорежущие станки. Но рассказывать на примерах чертежей может оказаться не самым полезным действием, намного нагляднее будет дать студенту возможность изучить его в виртуальной реальности и сопроводить виртуальным ассистентом, что сэкономит время преподавателя и повысит качество усвоения материала[2].

В качестве примеров внедрения технологий виртуальной реальности в образовательные процессы можно привести “Виртуальный тренажер токарно-винторезного универсального станка ИИ611П” и “Тренажер виртуальной реальности интерферометра Маха-Цендера”. Данные тренажеры являются хорошим примером оптимизации учебных процессов. Например, в случае токарно-винторезного станка мы, во-первых, ограждаем студента, у которого может не быть опыта работы с подобными установками, от опасного оборудования, которое может нанести травмы, во-вторых, предоставляем возможность преподавателю не обучать каждого студента, желающего работать на станке, лично а передать его в руки виртуального ассистента, и, в-третьих, предоставить возможность студенту изучить внутреннее устройство станка, разобрать и собрать собственными руками, для более глубокого осознания принципа работы установки, без работы с реальным станком, который в это время может быть использован по назначению.

Изучив более детально “Тренажер виртуальной реальности интерферометра Маха-Цендера” становится понятно, что он не только хорошо вписывается в учебный процесс, но и имеет большой потенциал для популяризации науки в обществе. Для наставления пользователя на верный путь может быть использован виртуальный помощник, который также расскажет о назначении каждого из компонентов достаточно подробно, а также может преподнести сложную теоретическую базу в игровой форме, что позволяет позитивно сказываться на образовательной составляющей данного тренажера.

Из рассмотренных примеров становится понятно, что возможности технологий виртуальной реальности позволяют оптимизировать образовательные процессы и повысить вовлеченность студентов в обучение. И несмотря на то, что виртуальная реальность появилась не так давно и является развивающейся и изучаемой областью, уже сейчас она удивляет своими возможностями и вносит неопределимый вклад в нашу жизнь. А с развитием технологий качество будет только повышаться.

### *Список литературы*

1. Резвых В.А., Горбачев А.Ю. Значимость технологий виртуальной и дополненной реальности в машиностроении - Тенденции развития науки и образования - 2021 - С.16-19.
2. Харитонов Л.С., Раскаткин Я.А., Эварт Т.Е. Разработка виртуальной лабораторий «Технология машиностроения» - Социально-экономические и технические проблемы оборонно-промышленного комплекса России: история, реальность, инновации Сборник статей по материалам IX Всероссийской научно-практической конференции - 2023 - С.399-404



А.А. ВОЛКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **АНАЛИЗ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ НИЯУ МИФИ К УЧАСТИЮ В ЧЕМПИОНАТАХ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО МАСТЕРСТВА НА ПРИМЕРЕ КОМПЕТЕНЦИИ «КВАНТОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»**

Произведён анализ текущего состояния чемпионатов профессионального мастерства в компетенции «Квантовые технологии», оценены уровень вовлечённости студентов и их результативность на чемпионате, изучены методики обучения и подготовки студентов-участников в НИЯУ МИФИ, а также роль инженерно-физического университета в их поддержке на протяжении подготовки и участия в чемпионате.

A.A. VOLKOV

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **ANALYSIS OF NRNU MEPHI STUDENTS' TRAINING TO PARTICIPATE IN PROFESSIONAL CHAMPIONSHIP ON THE EXAMPLE OF THE COMPETENCY “QUANTUM TECHNOLOGIES”**

An analysis was made of the current state of professional championships in the “Quantum Technologies” competency, the level of student involvement and their performance at the championship was assessed, the teaching and training methods of student participants at NRNU MEPHI were studied, as well as the role of the engineering and physics university in supporting them throughout preparation and participation in the championship.

Участие в чемпионатах профессионального мастерства, проводимых по методике Worldskills, в настоящее время является неотъемлемой частью профессиональной подготовки студентов ряда направлений. В частности, компетенция «Квантовые технологии» оказывается полезна для направлений 03.03.01 «Прикладные математика и физика» (преимущественно обучающихся по программе «Квантовый инжиниринг») 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии», 12.03.03 «Фотоника и оптоинформатика» и некоторых других. Компетенция «Квантовые технологии» является индивидуальной, участники от одной организации, как правило, являются прямыми конкурентами друг друга за призовые места на компетенции. Развитие компетенций, умений и навыков, получаемых в ходе таких соревнований, значительно влияет на будущую карьеру и интеграцию студентов в профессиональное сообщество [1].

За последние 2 сезона соревнований (2022 и 2023 годы) студенты-участники компетенции «Квантовые технологии» заработали 2 бронзовых, 4 серебряных и 3 золотых медали. В совокупности по данной компетенции в чемпионатах приняли участие 5 участников и 6 экспертов-компатриотов (включая бывших участников) из числа студентов и сотрудников НИЯУ МИФИ.

За упомянутый период наблюдается рост заинтересованности студентов в участии в соревнованиях. Так из 27 участников курса по подготовке к сдаче демонстрационного экзамена по методике Worldskills по компетенции «Квантовые технологии» в 2021-2022 годах в отборочном этапе 2022 года приняли участие 3 человека. В 2023 году количество участников отборочного этапа возросло до 6 человек.

Несмотря на конкуренцию на соревнованиях, при подготовке новых участников чемпионата наблюдается развитая горизонтальная передача знаний, при которой более опытные участники принимают непосредственное участие в обучении и наставлении новичков, что способствует общему росту результативности участников в составе сборной университета или сборной Госкорпорации «Росатом». Существует также и конструктивная тенденция перехода победителей и призёров предшествующих чемпионатов на роли экспертов-компатриотов в последующие сезоны. Положительный опыт участия эксперта-компатриота в чемпионате в качестве участника позволяет увеличить шансы связки «Участник – Эксперт-компатриот» занять призовые места в спорных и граничных по заработанным очкам ситуациях.

Курс подготовки к участию в компетенции «Квантовые технологии» продолжает играть ключевую роль при отборе будущих участников, при их подготовке и развитии их умений и навыков до начала сезона соревнований. На текущий момент обновлённые методические пособия для дополнительной подготовки проходят стадию финального тестирования и проверки.

Начиная с середины сезона 2022 года в НИЯУ МИФИ значительно возросли возможности по подготовке участников к чемпионатам в связи с открытием учебно-научного центра «Квантовый инжиниринг» и учебно-научных лабораторий на его базе. Кроме того, в течение сезона 2024 года ожидается дальнейший рост заинтересованности студентов и их результативности на соревнованиях как следствие запуска курса «Введение в квантовые технологии».

### *Список литературы*

1. Техническое описание компетенции «Квантовые технологии», Worldskills Russia, 2023

С.В. ГЕНИСАРЕТСКАЯ, А.А. СОЛОВЬЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **РАЗВИТИЕ КРИТИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

В Институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ разработан курс «Критическое мышление и основы научных коммуникаций», в рамках которого формируется не только мышление, но и целостная картина мира. Курс ориентирован на студентов технических вузов. Курс способствует формированию у студентов когнитивных и социально-поведенческих навыков, развитию научного мышления, более полной картины мира, что необходимо для становления будущих ученых, исследователей, инженеров.

S.V. GENISARETSKAYA, A.A. SOLOVEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **CRITICAL THINKING DEVELOPMENT FOR STUDENTS OF THE TECHNICAL UNIVERSITY**

The course «Critical thinking and the basics of scientific communications» has been developed by the LaPlas Institute of the National Research University MEPhI. Not only thinking, but also a holistic picture of the world is formed within the course. The course is aimed at students of technical universities. The course promotes the formation of students' cognitive and socio-behavioral skills, the development of scientific thinking, a more complete picture of the world, which is necessary for the formation of future scientists, researchers, engineers.

Постоянно происходящие изменения в мире, т.е. меняющиеся условия жизнедеятельности, ставят университеты перед необходимостью трансформации образовательного процесса таким образом, чтобы, помимо сугубо профессиональных знаний, формировать у студентов когнитивные и социально-поведенческие навыки. По опросу, проведенному порталом Работа.ру и СберПодбор, 49% респондентов из числа работодателей и 35% респондентов из числа работников отметили как необходимый навык «Креативность и умение решать проблемы», а такой навык, как «Межличностное общение, включая умение слушать, выражать свои мысли и разрешать конфликты» отметили по 35 % респондентов из обеих групп.

Как правило, на социо-гуманитарных направлениях подготовки формирование такого рода навыков естественным образом влетается в основную канву учебного плана. В технических вузах такого рода подготовке уделяется недостаточно внимания, что, в итоге, снижает уровень мышления, особенно научного мышления, выпускников – ученых, исследователей, инженеров. Технические и научно-исследовательские университеты, особенно первого звена, внедряют в свои учебные программы курсы и модули, способствующие развитию т.н. мягких навыков и развитию мышления в целом, но актуальной задачей является разработка курсы, специально ориентированного на студентов именно технических вузов.

В Институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ разработан и реализуется курс «Критическое мышление и основы научных коммуникаций», в рамках которого в формате игры, упражнений и свободной дискуссии формируется не только мышление, но и целостная картина мира. На семинарах студенты научаются структурированно формулировать свои мысли как письменно, так и устно; искать аргументы, опираясь на факты и источники; использовать творческие подходы при решении разного рода задач; вести дискуссию.

Основной курса является т.н. ридер – список текстов, на основе которых строится дискуссия. Ридер для курса был проработан с учетом специфики технического университета, туда в основе своей вошли тексты из научно-популярных произведений, причем как в области непосредственно физики и математики, так и социологии, политологии, медицины, философии. Таким образом, даже сами тексты способствуют формированию у студентов более полной картины мира.

### *Список литературы*

1. Российская академия образования, ИЦ «Библиотека им. К. Д. Ушинского» РАО, Дайджест Новинки литературы по вопросам образования, № 4 (77), 2 февраля 2024, стр. 7-8
2. Эдвард Ф. Кроули, Йохан Малмквист, Сорен Остлунд, Дорис Р. Бродер, Кристина Эдстрем «Переосмысление инженерного образования», Издательский дом Высшей школы экономики, 2015 г.
3. С.В.Генисаретская. Опыт построения курса "Критическое мышление и основы научной коммуникации" в техническом университете // Письма в Эмиссия.Оффлайн (The Emissia.Offline Letters): электронный научный журнал. 2022. №2 (февраль).

## МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ НА ПРИМЕРЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Работа рассматривает тему, связанную с методикой разработки тренажеров, включающих в себя создание искусственных рабочих сред, на примере интерферометра Маха-Цендера. В тексте обсуждаются аспекты, связанные с содержанием и методикой обучения, возникающие при разработке тренажеров. Рассматриваются уникальные аспекты использования теории обучения в погружающих средах при проектировании тренажеров, использующих виртуальные обучающие платформы.

A.N. ELAGINA, K.F. BORODIN, D.A. SINITSA, M.S. TOLSTOV  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## METHODOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF VIRTUAL SIMULATORS USING THE EXAMPLE OF THE MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

This article examines a topic related to the methodology of developing simulators, including the creation of artificial working environments, using the example of the Mach-Zehnder interferometer. The text discusses aspects related to the content and methodology of training that arise during the development of simulators. The unique aspects of the use of learning theory in immersive environments in the design of simulators using virtual learning platforms are considered.

В работе рассматриваются основные условия применения иммерсивных тренажеров: особенности взаимодействия пользователя с тренажером, учет педагогических, эргономических и медицинских требований, параметры и порядок оценки использования пользователем тренажера в случае виртуального тренажера интерферометра Маха-Цендера [1].

Сформулирован вывод о оптимизации процесса и выявлены основные этапы разработки виртуальных тренажеров: постановка задачи, разработка системы оценки и контроля прохождения, разработка сценария и алгоритма, создание 3D моделей, моделирование процессов в VR-пространстве, и, наконец, изучение сбалансированности учебного материала и времени его освоения с помощью данной формы обучения, проверка удовлетворенностью преподавателей и обучающихся итоговым продуктом.

Общее взаимодействие пользователя с виртуальной установкой можно разбить на этапы (рис. 1).

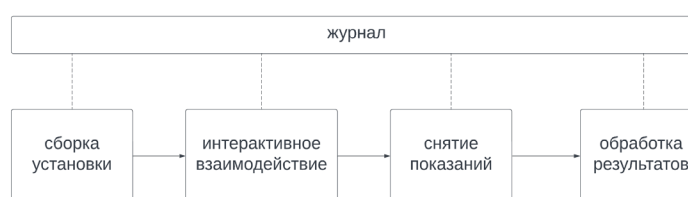


Рис. 1. Схема взаимодействия пользователя с виртуальным тренажером.

Каждый из этапов рассматривается как отдельная модель, некая зависимость выходных параметров, передающихся на следующий этап, от входных.

Журнал: содержит цели, описание поставленной задачи (лабораторной работы) и краткие характеристики используемых объектов.

Сборка установки: на этом этапе отрабатывается правильность сборки - расположение составных частей, их угол поворота, отсутствие лишних элементов и наличие всех необходимых; юстировка.

Интерактивное взаимодействие: настройка интерактивных частей элементов сборки в соответствии с заданием.

Снятие значений: снятие значений и занесение прямых измерений в журнал.

Обработка результатов: для отработки навыков подсчета погрешности вводится искусственный разброс данных для создания инструментальной погрешности.

В случае этапа "сборка установки" взаимодействие происходит следующим образом: сначала пользователь выбирает источник и удовлетворяющие требованиям элементы сборки, после размещает элементы на схеме и подключение лазера. Далее происходит переход на следующий этап, где перед пользователем ставится задача совмещения "пятен", для получения интерференционной картины. На этапе снятия показаний пользователь, вращая второй ползунок, смещает интерференционные полосы, и заносит значения угла поворота стеклянной пластинки и количество смещенных полос в таблицу. Этап обработки результатов заключается в получении показателя преломления пластинки и проверке, что полученные экспериментальные данные совпадают с теоретическими в пределах погрешности.

### Список литературы

1. Лабораторный практикум «ОПТИКА» / Под ред. Д.А. Самарченко. В 3-х частях. Ч. 2: Учебное пособие. Переиздание. М.: МИФИ, 2009. — 72 с.

## ПРОЕКТНАЯ ПРАКТИКА ПО ЭЛЕМЕНТАМ АВТОМАТИКИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ «АВТОМАТИКА»

В докладе рассмотрены методика и конкретные примеры проведения проектной практики по элементам автоматических устройств систем управления физическими установками.

Проектная практика проводится на третьем курсе для бакалавров кафедры «Автоматика» при изучении курсов «Датчики и детекторы» и «Исполнительные устройства систем управления» в рамках часов, отведённых студентам для самостоятельной работы. Для лучшего понимания и усвоения студентами материала, особенно тех его разделов, которые могут вызывать затруднения, предлагается использовать интегральный подход. Это значит, что теоретические знания, полученные в рамках курсов, будут применяться на практике при выполнении лабораторных работ и курсовых проектов.

Доклад содержит конкретные примеры работы студентов, выполненные на базе лабораторий НИЯУ МИФИ.

N.V. KOBEL'EV, I.M. POLOVINKO, G.P. TEREKHOV  
*National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia*

## DESIGN PRACTICE ON ELEMENTS OF AUTOMATION FOR STUDENTS OF THE DEPARTMENT "AUTOMATION"

The report discusses the methodology and specific examples of project practice on the elements of automatic devices of control systems for physical installations. Project practice is conducted in the third year for bachelors of the Department of Automation when studying the courses "Sensors and detectors" and "Control system actuators" within the hours allotted to students for independent work. For a better understanding and assimilation of the material by students, especially those sections of it that may cause difficulties, it is proposed to use an integral approach. This means that the theoretical knowledge gained during the courses will be applied in practice when performing laboratory work and course projects.

Техническая реализация систем автоматического управления базируется на применении широкого спектра элементов автоматизации, ключевыми из которых являются датчики технологических параметров (температура, давление, усилие, линейные перемещения, расход и т. д.) и исполнительные устройства систем управления (электромеханические, электромагнитные, коммутационные и т. д.). Элементы автоматизации изучаются студентами кафедры «Автоматика» в рамках двух курсов «Датчики и детекторы» (6 семестр) и «Исполнительные устройства систем управления» (7 семестр).

Для лучшего понимания и усвоения студентами материала используется интегральный подход. Интеграция теоретических знаний из двух курсов позволит студентам лучше понять принципы работы датчиков и исполнительных устройств, а также их взаимодействие в системе автоматического управления.

Инструментом для реализации интегрального подхода является проектная практика студентов. Она часто проводится под руководством опытного наставника, который помогает студенту в процессе выполнения проекта, предоставляя рекомендации, советы и обратную связь. Проектная практика служит для развития у студентов навыков самостоятельного решения проблем, управления временем, работы в команде и общения. Это также отличный способ применения теоретических знаний на практике и приобретения опыта, который может быть полезен при трудоустройстве после окончания обучения.

**I. Методика.** Предусматривает интеграцию теоретических разделов курсов «Датчики и детекторы» и «Исполнительные устройства систем управления» затрудненных для абстрактного понимания студентами изучаемого материала:

- тиристорные усилители и их применение для регулирования энергетических величин.
- промышленные датчики неэлектрических величин и особенности схемотехнического подключения к тиристорным усилителям.

**II. Практика.** Разработка и макетирование по заданию преподавателя конкретного регулятора теплотехнических и светотехнических величин на базе промышленных датчиков температуры и освещенности с использованием тиристорных регуляторов. Исследование регулировочных и нагрузочных характеристик.

**III. Презентация.** Составление студентами отчёта по проектной практике с элементами исследовательской работы. Подготовка доклада и слайдов по защите практики. Публичная защита практики в форме доклада. Студенты учатся структурировать информацию, выделять главное и представлять результаты своей работы в доступной и понятной форме, выступать перед аудиторией, отвечать на вопросы, отстаивать свою точку зрения и корректно реагировать на критику.

Таким образом, интеграция теоретических знаний из двух курсов позволит студентам лучше понять принципы работы датчиков и исполнительных устройств, а также их взаимодействие в системе автоматического управления.

### *Список литературы*

1. G.P. Terekhov, V.P. Mikheev, B.E. Levkovich. Educational and methodological manual on the use of the laboratory stand "Electromechanics" for the practical study of electrical machines and electric drives // National Research Nuclear University "MEPHI". M.: Printing house of National Research Nuclear University MEPHI, 2021, 120 p.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НА СЛУЖБЕ «ИНЖЕНЕРНОЙ ГРАФИКИ»

При обучении студентов предмету «Инженерная графика» интеллектуальная система будет помогать в работе преподавателю, а студентам изучать проектирование и графические дисциплины. Интеллектуальная система будет формировать в студентах инженерные способности.

V.M. KOROBOV, B.E. LEVKOVICH

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## AN INTELLIGENT SYSTEM IN THE SERVICE OF ENGINEERING GRAPHICS

When teaching students the subject of Engineering Graphics, the intelligent system will help the teacher in his work, and students will study design and graphic disciplines. The intelligent system will shape students' engineering abilities.

Интеллектуальная система “Профессор” (рис.1.) создается для повышения качества учебного процесса и облегчения работы преподавателей [1]. Система будет включать в себя: хранение баз (преподавательская, студенческая и база знаний); выполнять функцию аналитика в проверках заданий (соответствие чертежей студентов с эталоном, выявляя ошибки и несоответствия), а также с согласием преподавателя выставлять оценку за выполненную работу. Аналитика (аналитическая записка): система будет анализировать ошибки студентов, выявляя наиболее частые и сложные моменты, требующие дополнительного объяснения и практики; по анализам системы преподаватель может корректировать базу знаний (обучение интеллектуальной системы “Профессор”).

Интеллектуальная система — это открытая система для внесения изменений в эталоны (уточнение, расширение понятий и согласование с ГОСТами), которая может сравнивать, оценивать и анализировать сравниваемые работы, выдавать рекомендации, комментарии для правки чертежей и давать оценку студенческой работе. В интеллектуальную систему вложен принцип модернизации, что дает системе развиваться в понимании учебного процесса.

Эталонами работ являются чертежи, созданные в системе T-FEX [2] с использованием ГОСТов.

Система “Профессор”, как интеллектуальный помощник сохраняет данные и все файлы в T-FEX DOCs преподавателей и студентов, а база знания сохраняется на сервере. Результаты анализа работ передается преподавателю для проверки правильности выводов системой и в случае некорректности выводов преподаватель корректирует базу знания и запускает интеллектуальную систему “Профессор”, чтобы устранить противоречие в результате проверки.

Автоматическое оценивание работ студентов: система может быть настроена на автоматическое оценивание работ на основе определенных критериев, что позволит преподавателям экономить время на проверке большого количества работ.

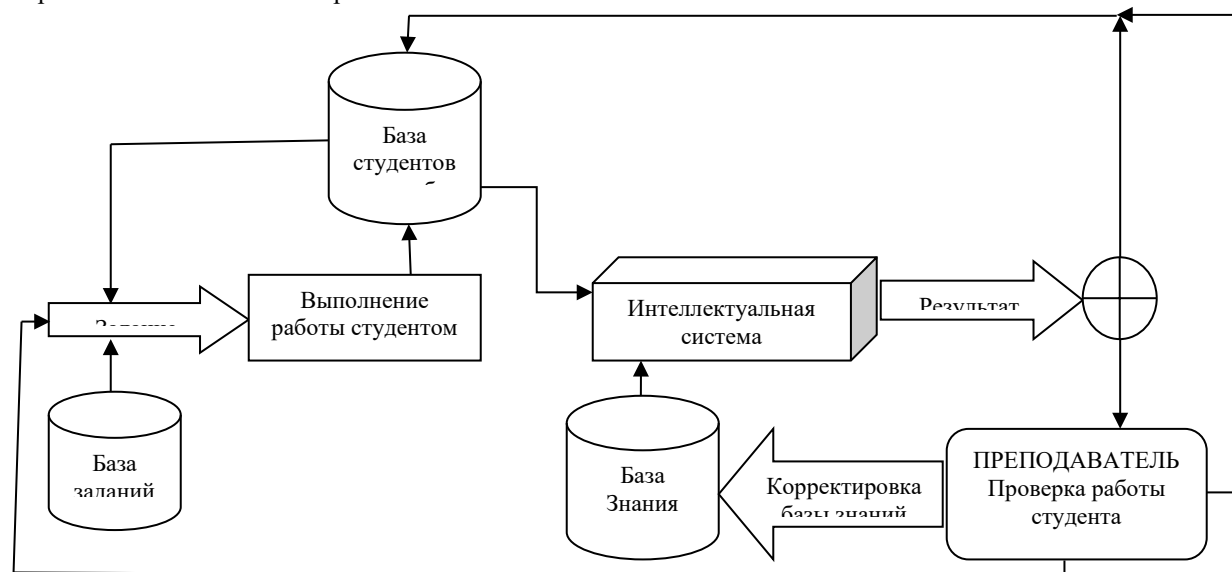


Рис. 1. Принцип работы интеллектуальной системы и преподавателя со студентом над заданием.

### Список литературы

1. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта: учебник/ А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. — Москва: ИНФРА-М, 2023. — 530 с.
2. Бикулов С. Переход от 2D к 3D в T-Flex CAD/CAM // САПР и графика, №12,2000. С.74-77.

## ИНТЕГРИРОВАННЫЙ УЧЕБНЫЙ ПЛАН «ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

Раздельное изучение курсов «Элементная база автоматических систем» в разных семестрах не позволяет проследить связь реальных технологических процессов с виртуальной системой регулирования в САУ, осуществляемую посредством датчиков и исполнительных устройств. Устранить противоречие, а так же для лучшего понимания и усвоения студентами материала, предлагается использовать интегральный подход - объединение курсов в интегральный учебный план.

B.E. LEVKOVICH, G.P. TEREKHOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## INTEGRATED CURRICULUM «ELEMENT BASE OF AUTOMATIC SYSTEMS»

The separate study of the courses "The element base of automatic systems" in different semesters does not allow us to trace the connection of real technological processes with a virtual control system in ACS, implemented through sensors and actuators. To eliminate the contradiction, as well as to better understand and assimilate the material by students, it is proposed to use an integral approach - combining courses into an integrated curriculum.

Техническая реализация систем автоматического управления (рис.1) базируется на применении широкого спектра элементов автоматики, ключевыми из которых являются датчики технологических параметров (температура, давление, усилие, линейные перемещения, расход и т. д.) и исполнительные устройства систем управления (электромеханические, электромагнитные, коммутационные и т. д.).

Элементы автоматики изучаются студентами кафедры «Автоматика» в рамках двух курсов «Датчики и детекторы» (6 семестр) и «Исполнительные устройства систем управления» (7 семестр). Курс «Датчики и детекторы» обычно включает в себя изучение принципов работы различных датчиков и детекторов, вопросы применения датчиков в различных отраслях промышленности и в быту. В свою очередь, курс «Исполнительные устройства систем управления» охватывает изучение принципов работы исполнительных устройств, их классификации и применения в системах автоматического управления [1].

Раздельное изучение этих двух курсов в разных семестрах не позволяет проследить связь реальных технологических процессов с виртуальной системой регулирования в САУ, осуществляемую посредством датчиков и исполнительных устройств. Устранить противоречие, а так же для лучшего понимания и усвоения студентами материала, особенно тех его разделов, которые могут вызывать затруднения, предлагается использовать интегральный подход - объединение курсов в интегральный учебный план.

План основан на изучении мехатронных подходов к созданию интеллектуальных исполнительных механизмов. Данный подход нацелен на интеграцию механических, электромеханических, электронных, электротехнических, компьютерных и интерфейсных элементов в единые мехатронные модули, минимизацию промежуточных преобразований энергии и информации, а также электрических и механических интерфейсов как отдельных блоков.

При этом под прямым цифровым управлением электроприводом понимается не только непосредственное управление от микроконтроллера каждым ключом силового преобразователя, но обеспечение возможности прямого ввода в микроконтроллер сигналов обратной связи от соответствующих датчиков (дискретных, аналоговых или импульсных).

Интеграция теоретических знаний из двух курсов позволит студентам лучше понять принципы работы датчиков и исполнительных устройств, а также их взаимодействие в системе автоматического управления.

Инструментом для реализации интегрального подхода является проектная практика студентов. В основы проектной практики положена «Инициатива CDIO». Идеологией CDIO (Conceive – Design – Implement – Operate) является освоение студентами инженерной деятельности в соответствии с моделью «Задумай – Спроектируй – Реализуй – Управляй», которая регламентирует активные методы обучения.

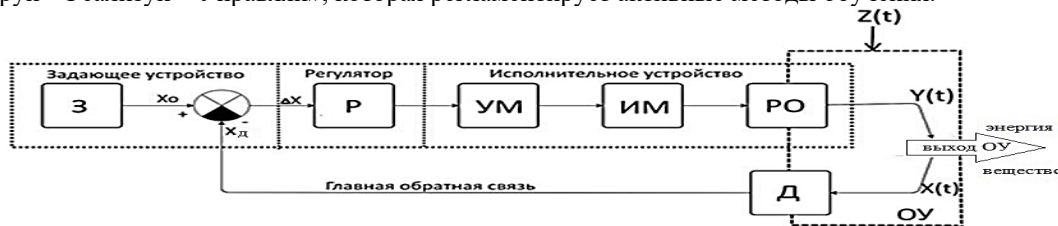


Рис. 1. Техническая реализация системы автоматического управления

### Список литературы

1. Г.П. Терехов, В.П. Михеев, Б.Е. Левкович. Учебно-методическое пособие по применению лабораторного стенда "Электромеханика" для практического изучения электрических машин и электроприводов // Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ". М.: Типография НИЯУ МИФИ, 2021г., 120с.

Я.С. ЛЯХОВА

*Российский квантовый центр, Сколково, Россия  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ПОДГОТОВКА КВАНТОВЫХ ИНЖЕНЕРОВ: ОБЗОР ПРОФЕССИИ И ПРИМЕР ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ НИЯУ МИФИ**

Проведён обзор российского и зарубежного опыта подготовки специалистов в области квантовых технологий, проанализированы запросы работодателей к представителям новой профессии «квантовый инженер». Сформулирован перечень требований, которым должна отвечать система подготовки квантовых инженеров. Реализация такой системы рассмотрена на примере образовательного гринфилда «Квантовый инжиниринг» в НИЯУ МИФИ.

YA.S. LYAKHOVA

*Russian Quantum Center, Skolkovo, Russia  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **TRAINING OF QUANTUM ENGINEERS: PROFESSION REVIEW AND THE EXAMPLE OF EDUCATIONAL PROGRAMM IN NRNU MEPHI**

A review of Russian and foreign experience in training specialists in the field of quantum technologies has been conducted, employers' requests to representatives of the new profession «quantum engineer» have been analyzed. The list of requirements the system of quantum engineers should meet is formulated. The implementation of such a system is considered on the example of the educational greenfield «Quantum Engineering» in NRNU MEPHI.

Квантовые технологии — область науки и техники, развивающаяся стремительными темпами. По разным прогнозам, новый рынок, связанный с этой областью, сформируется на горизонте 5-10 лет. К этому моменту в России уже должны быть готовы к работе специалисты-прикладники, способные быстро встроиться в научно-технологический процесс. Подготовка таких специалистов в области квантовых технологий — это работа на опережение. При этом имеющиеся образовательные подходы в текущем виде не подходят для решения проблемы, так как с одной стороны, речь идёт о работе в принципиально контринтуитивной области квантовой механики, что требует ранней «квантовой» прошивки сознания будущего специалиста; а с другой, это одно из наиболее активно развивающихся направлений, в котором краеугольное значение имеет актуальность на уровне сегодняшнего дня. К настоящему моменту в России не существует полноценного решения по подготовке специалистов-прикладников в области квантовых технологий («квантовых инженеров»).

Доклад представляет собой обзор российского и зарубежного опыта подготовки специалистов в области квантовых технологий, анализ запросов работодателей. По результатам проведённого исследования сформулированы критерии, которым должна отвечать система подготовки квантовых инженеров.

В качестве конкретного примера ответа на исходящий от области квантовых технологий запрос рассматривается программа подготовки бакалавров «Квантовый инжиниринг». Программа реализуется в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» с 2022 года. В качестве общего подхода к решению поставленной задачи авторами программы был выбран формат образовательного «гринфилда». В докладе рассматриваются отличительные особенности программы подготовки бакалавров, строится прогноз дальнейшего развития проекта.

### *Список литературы*

1. Fox M.F.J., Zwickl B.M., Lewandowski H.J. // Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 2020. Vol. 16. P. 020131.
2. Asfaw A., Blais A., Brown K.R. and others // IEEE Transactions on Education. 2022. Vol. 65, № 2. P. 220—242.

## ВИРТУАЛЬНЫЙ АНАЛОГ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «ЭФФЕКТ ЗЕЕМАНА»

В рамках курса общей физики создан виртуальный аналог лабораторной работы, посвященной исследованию зеемановского расщепления спектральных линий кадмия. Виртуальный аналог воспроизводит все возможности, предоставляемые реальной работой, и дополнительно дает возможность наблюдать и измерить расщепление еще 7 линий кадмия в видимом диапазоне.

A.N. MAKSIMOVA, N.A. KLYACHIN, A.YU. MATRONCHIK, S.S. MURAVIOV-SMIRNOV, E.M. SEREBRYAKOVA, V.A. SHILOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## A VIRTUAL ANALOGUE OF THE LABORATORY WORK "ZEEMAN EFFECT" IN THE FRAMEWORK OF THE GENERAL PHYSICS COURSE

As part of the general physics course, a virtual analogue of the laboratory work devoted to the study of the Zeeman splitting of cadmium spectral lines has been created. The virtual analogue reproduces all the possibilities provided by real work, and additionally makes it possible to observe and measure the splitting of 7 more cadmium lines in the visible range.

Виртуальный практикум в последнее время широко используется в учебном процессе вузами физических специальностей. Особенную ценность виртуальный практикум приобретает в курсах атомной и ядерной физики, квантовой механики: реальный эксперимент может представлять опасность при выполнении студентами, требовать дорогостоящего оборудования или быть невозможным.

Для изучения эффекта Зеемана необходимы приборы высокой разрешающей силы и сильные (более 1 Тл) магнитные поля. В условиях учебной лаборатории удовлетворить этим требованиям довольно сложно. Вариант программной реализации, симуляция эксперимента описаны в работах [1,2]. Выполненный нами программный симулятор моделирует реальную работу «Эффект Зеемана» [3] лабораторного практикума курса общей физики.

В работе исследуется нормальный эффект Зеемана, наблюдаемый при расщеплении красной линии кадмия  $5^1D_2 \rightarrow 5^1P_1$  (длина волны 634,8 нм). Зеемановское расщепление составляет менее  $0.5 \text{ \AA}$ . На рис. 1 показан внешний вид виртуального стенда. Программа, аналогично реальной установке, позволяет менять внешнее магнитное поле, вести наблюдение параллельно и перпендикулярно внешнему полю, устанавливать четвертьволновую пластинку для исследования поляризации излучения. Также на рисунке показан фрагмент графического кода программы.

В дополнение к реальной работе, виртуальный аналог позволяет наблюдать расщепление еще 7 спектральных линий. Частоты расщепленных линий вычисляются по формуле  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega_0(g_2m_{j_2} - g_1m_{j_1})$ , где  $g_{1,2}$  – факторы Ланде нижнего и верхнего уровня, соответственно. Программа реализована в среде LabView.

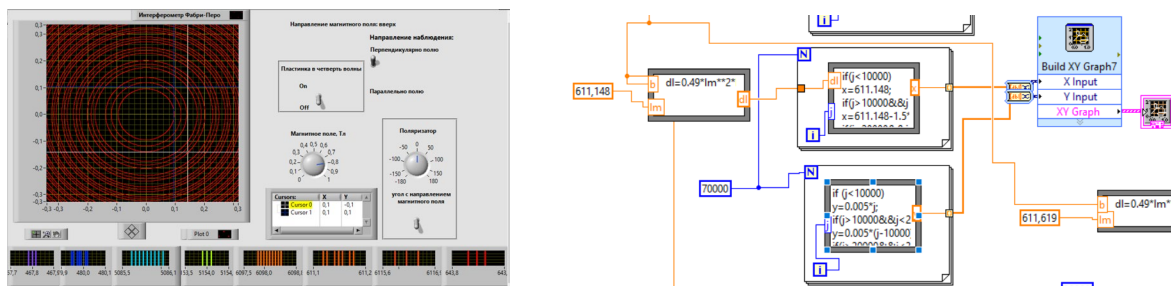


Рис. 1. Внешний вид виртуального стенда и фрагмент кода, отображающий расщепление линии  $\lambda=611,1 \text{ нм}$ .

Виртуальный аналог лабораторной работы может использоваться при допуске к выполнению реальной работы, при выходе из строя лабораторного оборудования или при переводе учебного процесса в дистанционный режим. Также выполнение данного виртуального аналога возможно в качестве задания на дополнительные баллы.

### Список литературы

1. Басов А. А., Соколова Г. М., Яшина А. Н. // Современное технологическое образование. – 2021. – С. 238-245.
2. Бессонов А. А., Дергобузов К. А. // Новые образовательные технологии в вузе (НОТВ-2014).—Екатеринбург, 2014. – 2014. – №. 11.
3. Бурханова Ю. Н., Галимова З. Х. // Научные исследования: фундаментальные и прикладные аспекты-2021. – 2021. – С. 38-41.



А.М. МАКУРЕНКОВ<sup>1</sup>, Е.В. КАРАВАЕВА<sup>1</sup>, А.И. КОВАЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия

<sup>2</sup>Факультет психологии, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Россия

## МОДЕЛЬ КОМПЕТЕНЦИЙ В НАУЧНОЙ СФЕРЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

Продемонстрирована Модель компетенций в научной сфере и сопряженных сферах деятельности, на основе которой с 2021 года функционирует специализированный раздел на портале ScienceID.net. Аналитическая часть раздела позволяет выявлять индивидуальные особенности развития компетенций пользователей, необходимых для профессиональной деятельности в научной сфере, а методическая часть содержит наборы рекомендаций для дальнейшего развития тех или иных профессиональных траекторий молодых ученых.

A.M. MAKURENKOV<sup>1</sup>, E.V. KARAVAEVA<sup>1</sup>, A.I. KOVALEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Physics Department, Lomonosov Moscow State University, Russia

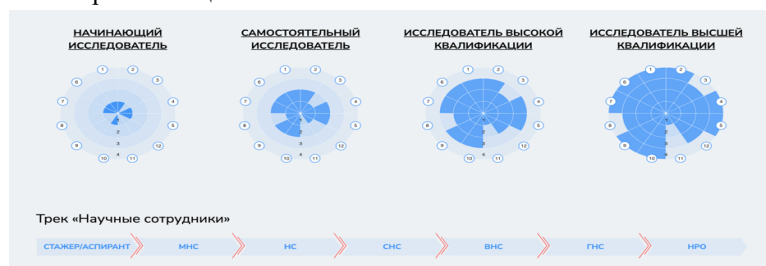
<sup>2</sup>Psychology Department, Lomonosov Moscow State University, Russia

## PROFESSIONAL CAREER DEVELOPMENT OF YOUNG SCIENTISTS WITH THE COMPETENCE MODEL IN THE FIELD OF SCIENCE

The Model of competencies in the field of science and related fields is the core for the special section of the ScienceID.net web-site since 2021. The analytical part of the section allows one to identify individual features of the competencies development which are necessary for professional activity in the field of science, and the methodology part contains sets of recommendations for the further development of young scientists' various professional careers.

Современные подходы к описанию профессионального портрета ученого в международной практике наиболее полно и точно формируют его через рамку компетенций. Пристальный взгляд на набор таких компетенций выявляет, что формирование ученого как исследователя расширяет возможное поле его профессиональной деятельности не только на научную сферу, но и сопряженные сферы деятельности.

В отечественной практике примером такой системы является «Модель компетенций в научной сфере и сопряженных сферах деятельности», разработанная при участии. На базе данной модели компетенций разработан аналитический раздел с методическими рекомендациями по профессиональному развитию на портале ScienceID.net (<https://scienceid.net/competence>), объединяющем молодых ученых, исследователей, инженеров и специалистов.



1. Исследовательский опыт и профессиональные знания. 2. Реализация жизненного цикла научного продукта (ЖЦНП). 3. Лидерство. 4. Научное творчество. 5. Саморазвитие и профессиональный рост. 6. Научная кооперация и коммуникация. 7. Социальная ответственность и взаимодействие с обществом. 8. Взаимодействие с деловым сообществом и институтами публичной

Рис. 1. Пример развития компетенций для эффективного профессионального роста по траектории «Научные сотрудники», примерно согласованных со шкалой профессиональных позиций (должностей).

Модель построена на сочетании двенадцати компетенций, которые соотносятся с опытом исследовательской деятельности, личностными качествами, а также научным наставничеством, научно-технологическим предпринимательством и управлением в научной сфере. Для успешного развития молодого ученого не требуется развития сразу всех компетенций, но рекомендуется определенные сочетания из 5-6 или более компетенций, которые характерны для определенной профессиональной траектории (рис. 1). В методической части портала размещены рекомендации по использованию различных инструментов для развития в рамках выбранной профессиональной траектории.

Для персонального определения степени развития компетенций разработан набор диагностических тестов, размещенных на портале, после прохождения которых пользователь, молодой ученый, получает свой «профессиональный портрет». Наглядное отображение степени развития компетенций выполнено с помощью карты компетенций в виде диаграммы, в которой для каждой компетенции предусмотрена градация четырех уровней ее развития.

Успешный опыт применения подобных моделей в мировой практике, по мнению авторов, делает целесообразной возможность адаптации подобной модели компетенций для профессионального развития молодых специалистов в области инженерной и инженерно-исследовательской деятельности.

А.П. ПЛЁНКИН

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

## ОПЫТ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА ПРИМЕРЕ ИНСТИТУТА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЮЖНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Изложены основные тенденции реализации проектной деятельности в высших учебных заведениях. Описаны примеры организации проектной деятельности для большинства образовательных программ. Приведены методы реализации и практики студенческих активностей по проектной и инженерной деятельности. Показаны примеры проектов, реализуемых студентами на разных программах и уровнях подготовки. Описан механизм организации проектной деятельности с учетом особенностей в реализации образовательных программ. Приведено описание мероприятий, направленных на развитие проектной деятельности.

A.P. PLJONKIN

Southern federal university, Taganrog, Russia

## EXPERIENCE OF PROJECT ACTIVITY ON THE EXAMPLE OF THE INSTITUTE OF COMPUTER TECHNOLOGY AND INFORMATION SECURITY OF THE SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY

The main trends in the implementation of project activities in higher educational institutions are outlined. Examples of organizing project activities for most educational programs are described. Methods of implementation and practice of student activities in design and engineering activities are presented. Examples of projects implemented by students at different programs and levels of training are shown. The mechanism for organizing project activities is described, taking into account the peculiarities of the implementation of educational programs. A description of activities aimed at developing project activities is provided.

В большинстве случаев система образования испытывает дефицит механизмов и инструментов, способных интегрировать проектную подготовку в учебный процесс. В первую очередь необходимо решать проблему нехватки сотрудников, способных обеспечить разработку, контроль и развитие методов проектного обучения. Основными стейкхолдерами в проектном обучении являются: университет, обучающийся и партнер [1–3]. При детальной декомпозиции структура трансформируется и выделяются уточняющие роли: обучающийся, команда, управленец (капитан команды), наставник, ментор, технический специалист (техлид), тьютор, эксперт, организатор, координатор, партнер, руководитель. Важнейшую роль при этом играют механизмы вовлечения обладателей ролей в проектную деятельность. Такие механизмы представляют особую ценность и для каждой роли могут отличаться. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия ролей. Одной из задач проектного обучения является моделирование работы студентов в компании над реальным кейсом.

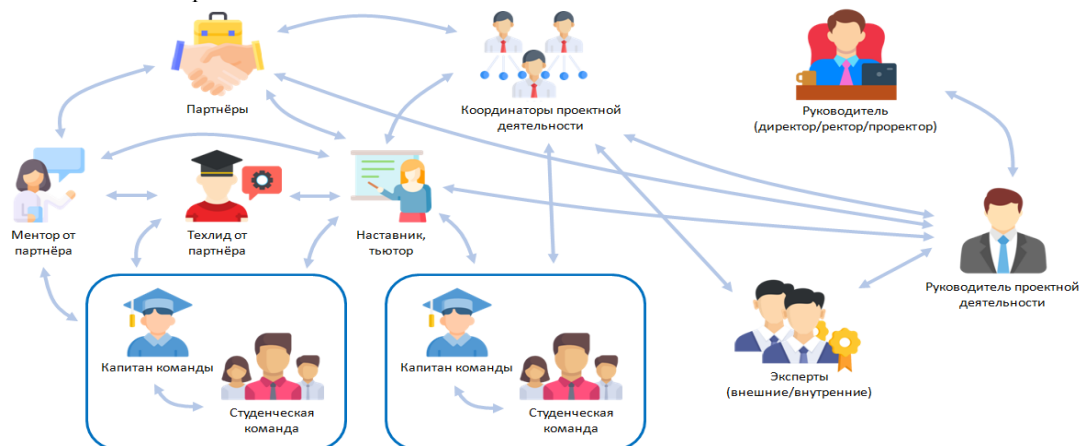


Рис. 1. Взаимодействие ролей в структуре проектной деятельности образовательной организации

Если смотреть на такой подход через призму образовательной программы, то можно представить обучение студента как индивидуальную траекторию с выбором дисциплин.

### Список литературы

1. Edward Gustaaf, Untung Rahardja, Qurotul Aini, Herliana Wahyu Maharani, Nesti Anggraini Santoso. Blockchain-based Education Project. Aptisi Transactions on Management (ATM) (2021), 10.33050/atm.v5i1.1433.
2. G.E. Veselov, A.P. Pljonkin, A.Y. Fedotova. Project-based learning as an effective method in education. ACM International Conference Proceeding Series (2019), 10.1145/3341042.3341046.
3. Yaya Tian, Shaweta Khanna, Anton Pljonkin. Research on machine translation of deep neural network learning model based on ontology. Informatica (Slovenia) (2021), 10.31449/inf.v45i5.3559.

Н.В. НАЙМИТЕНКО, М.А. ПЛОТЯНСКАЯ, К.В. СЕРДЮК, В.Г. ФЕДЧЕНКО

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия*

## **РЕАЛИЗАЦИЯ СЕТЕВОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УНИВЕРСИТЕТА И ПРЕДПРИЯТИЯ**

Рассмотрена реализация сетевой образовательной программы на базе Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения с участием предприятия-партнера. Обучение по программе сетевого образования позволяет оптимизировать процесс обучения и реализовать более эффективное сочетание теоретических и практических знаний.

N.V. NAIMITENKO, M.A. PLOTIANSKAYA, K.V. SERDIUK, V.G. FEDCHENKO

*St. Petersburg state University of aerospace instrumentation, St.-Petersburg, Russia*

## **IMPLEMENTATION OF A NETWORK EDUCATIONAL PROGRAMME WITHIN THE FRAMEWORK OF UNIVERSITY-ENTERPRISE CO-OPERATION**

The paper considers the implementation of a network education programme on the basis of St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation with the participation of a partner enterprise. Training under the network education programme allows to optimise the learning process and implement a more effective combination of theoretical and practical knowledge.

Сетевое образование становится все более популярным и востребованным в современном мире. Под сетевой формой реализации образовательных программ подразумевается организация обучения с использованием ресурсов нескольких вузов, а также компаний и предприятий. Такое взаимодействие позволяет повысить качество и доступность высшего образования, а также расширить перечень специальностей и направлений подготовки, предлагаемый университетами. Также представляется возможность получения качественного образования с наличием теоретической и практической базы.

Санкт-петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения активно реализует сетевое обучение с предприятием-партнером, с целью удовлетворения потребности студентов и работников в образовании. Программа сетевого образования успешно внедрена в курс учебных дисциплин «Основы оптики» и «Лазерные технологии» для направлений подготовки «Лазерная техника и лазерные технологии» и «Оптико-электронные приборы и комплексы».

Содержание дисциплин охватывает круг вопросов, связанных с получением студентами знаний основ физики лазеров и лазерной техники, их элементной базы, свойств и преимуществ лазерного излучения, возможностей применения лазеров в науке, технике и технологиях, а также организации и навыков управления работой лазера и лазерной техникой, разработки технической документации, планирования и управления лазерной обработкой материалов. Программа реализуется с использованием ресурсов университета и предприятия-партнера, а именно современное лазерное оборудование и квалифицированные специалисты компании ООО «Лазерный Центр».

В рамках сотрудничества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и предприятия-партнера курс учебной дисциплины «Лазерные технологии» был разработан и внедрен с учетом стандартов Агентства развития профессий и навыков. После прохождения обучения, в конце учебного семестра проводится практикоориентированный экзамен в рамках комплекта оценочной документации (К.О.Д.).

Сетевое образование включает в себя как формальные, так и неформальные элементы образовательной деятельности и используется разнообразные ресурсы, включая материальные, организационные, учебные, научные и воспитательные [1-3]. Создание сетевой программы позволило оптимизировать процесс обучения и эффективно повысить качество образования благодаря взаимодействию фундаментальных знаний университета и современному практическому применению оборудования предприятия-партнера. Выпускники программы могут использовать свои теоретические знания и практические навыки, чтобы успешно устроиться на рынке труда или продолжить обучение в магистратуре.

### *Список литературы*

1. Шуклина, Е. А. Сетевой университет как форма развития сетевых взаимодействий в образовательном пространстве макрорегиона / Е. А. Шуклина // Российские регионы в фокусе перемен : сборник докладов XII Международной конференции, Екатеринбург, 16–18 ноября 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Высшая школа экономики и менеджмента. Том 2. – Екатеринбург: ООО "Издательство УМЦ УПИ", 2018. – С. 84-98.
2. Новиков А.Е. Сетевое обучение как перспективное направление в системе образования // Инновационные проекты и программы в образовании. 2010. №1. – С. 53-55.
3. Патаракин Е.Д. Сетевые сообщества и обучение / Е.Д. Патаракин. – М.: ПЭР СЭ, 2006. –112 с.

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАХА-ЦЕНДЕРА

В статье рассматривается актуальность новых технологий в образовании, в частности, виртуальных тренажеров. Разобраны понятия образовательного и виртуального тренажеров. Приведена классификация виртуальных тренажеров. На примере интерферометра Маха-Цендера приведен подход к созданию обучающего приложения. Приведен план, по которому происходит процесс создания тренажера. Пояснен выбор игрового движка Unreal Engine в качестве системы разработки и его возможности объектно-ориентированного программирования. В статье рассматриваются подходы к созданию 3D моделей, их UV-разверток, создание текстурных карт. Описана сама установка, собрав которую, обучаемый получает интерференционную картину. Помимо описания установки, объясняется принцип ее работы. После ознакомления с оборудованием и его свойствами в реальном мире, приведено описание реализации этого в виртуальном тренажере и причины тех или иных решений.

D.A. SINITSA, A.N. ELAGINA, M.S. TOLSTOV, K.A. BORODIN  
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

## CREATION OF A VIRTUAL SIMULATOR OF THE MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER

The article examines the relevance of new technologies in education, in particular, virtual simulators. The concepts of educational and virtual simulators are analyzed. The classification of virtual simulators is given. Using the example of the Mach-Zehnder interferometer, an approach to creating a training application is presented. The plan is given according to which the process of creating the simulator takes place. The choice of the Unreal Engine game engine as a development system and its object-oriented programming capabilities are explained. The article discusses approaches to creating 3D models, their UV scans, and creating texture maps. The installation itself is described, after assembling which, the student receives an interference pattern. In addition to the description of the installation, the principle of its operation is explained. After familiarization with the equipment and its properties in the real world, a description of the implementation of this in a virtual simulator and the reasons for certain decisions are given.

В настоящее время технологии развиваются с высокой скоростью во всех направлениях. Не обошли стороной и образование. В нем появилось такое направление как виртуальные тренажеры. В работе рассматриваются примеры разработок разных виртуальных тренажеров, дается их классификация.

Основной частью работы является рассмотрение подхода создания виртуального тренажера интерферометра Маха-Цендера. Установка состоит из лазера, двух светоделителей, двух зеркал, мишени [1]. Схема установки приведена на рисунке 1.

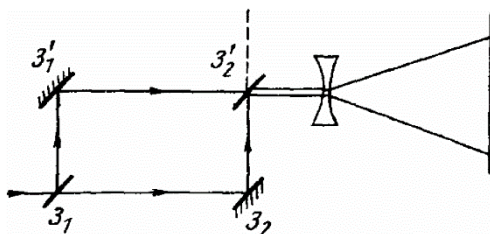


Рис. 1. Схема движения луча от его излучателя до экрана.

При создании подобных тренажера Маха-Цендера нужно выбрать подходящую среду разработки. Ей стал игровой движок Unreal Engine. Он позволяет работать с полигональными 3D моделями и создавать логику взаимодействия между объектами.

Для работы с полигональными моделями была выбрана программа Blender 3D. Она позволяет создавать оптимизированные объекты для движка, создавать текстуры, которые формируют внешний вид модели, а также создавать анимации.

Оптимизация моделей необходима для быстрой и плавной работы приложения. Качественные текстуры и анимации формируют у пользователя приятное впечатление от игрового процесса и обучения в виртуальном тренажере.

Создание объектов делится на два этапа. Первый – это непосредственно моделирование объектов. Второе – создание UV развертки. UV-развертка – это связующая между моделью и текстурами. Она переносит координаты текстур с 2D плоскости на 3D объект.

В работе делается акцент на программировании. Методы объектно-ориентированного программирования можно достичь эффективного взаимодействия функциональных блоков друг с другом, а также в любой момент расширить функционал, не переписывая исходный код. В тренажере по интерферометру Маха-Цендера это необходимо, так как дальнейшей задачей будет добавление новых установок и создание комплекса лабораторных работ.

### Список литературы:

1. Лабораторный практикум «ОПТИКА» / Под ред. Д.А. Самарченко. В 3-х частях. Ч. 2: Учебное пособие. Переиздание. М.: МИФИ, 2009. — 72 с.

## ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ - ИНСТРУМЕНТ РАЗВИТИЯ СКВОЗНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ

Предложен интерактивный формат проведения аудиторных занятий в рамках школьной программы проектной деятельности. В основе данного формата лежат кейс-ориентированные задания, нацеленные на развитие сквозных компетенций. Курс рассчитан на 16 занятий по 90 мин. Каждое занятие посвящено отдельному элементу структуры научно-исследовательской/ проектной деятельности: начиная проблематикой и заканчивая защитой и презентацией работы. Кейс-ориентированный формат в своей основе имеет открытые задания, не имеющие единственного и однозначно правильного варианта решения.

A.A. SOLOVEV, S.V. GENISARETSKAYA  
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

## PROJECT ACTIVITY AS A TOOL FOR DEVELOPING CROSS-CUTTING COMPETENCIES

The interactive format of classroom classes within the framework of the school program of project activities is proposed. This format is based on case-oriented tasks aimed at developing cross-cutting competencies. The course is designed for 16 classes of 90 minutes each. Each lesson is devoted to a separate element of the structure of research/project activities: starting with problems and ending with the presentation of the work. The case-oriented format is based on tasks that do not have a single and unambiguously correct solution.

Основной проблемой современного образования является формат «колей». Рецепт успеха в рамках школьного и, отчасти, университетского образовательного процесса отдельно взятого человека имеет понятную и прозрачную структуру: демонстрация полученных знаний, умений и навыков, полученных в четко заданных рамках. У обучающихся нет необходимости решать задачи в условиях неопределённости. В реальной жизни решения задач не имеют четкого и прозрачного алгоритма действий. Современный мир в своей основе имеет формат проектов: «от идеи до продукта». Задачи реальных проектов требуют самостоятельного поиска и принятий решений. Ключевым вопросов современной педагогики является воспитание нового поколения, способного определять цели, формулировать задачи, критически анализировать и, самое главное, действовать.

Перспективным форматом самостоятельной работы школьников является проектная деятельность. Формат данной работы позволяет самостоятельно пройти основные этапы проекта. Но, не имея теоретических знаний, многие элементы проектной деятельности для обучающихся остаются недостижимыми.

Коллективом преподавателей Института ЛаПлаз НИЯУ МИФИ был предложен формат аудиторных занятий, в основе которых лежат кейс-ориентированные задания (кейсы), созданные на базе реальных ситуаций. В рамках 90 минут командам от 2 до 5 человек предлагается дать аргументированные ответы на поставленные в рамках кейса вопросы. Ключевой особенностью кейсов является открытый формат решений. Каждая тема занятий посвящена отдельному элементу структуры научно-исследовательской/проектной деятельности. В рамках каждой темы проходит развитие отдельных сквозных навыков: критического и аналитического мышления, творческого мышления, командной работы и т.д.



Рис. 1. Пример инфографической карточки кейс-ориентированного задания

Кейс-ориентированные задания оснащены инфографическими карточками, в количестве от 2 до 15 в зависимости от задания. Такой формат заданий позволяет уложиться во временные рамки аудиторного занятия длительностью 90 минут, а интерактивный стиль - решать задачи с открытой формой решения.

### Список литературы

1. В.С. Лазарев Проектная деятельность в 10-11 классах. Разработка и защита индивидуального проекта. ФГОС. Владос, 2023
2. И. А. Кобякова Основы исследовательской и проектной деятельности. Учебное пособие. Феникс, 2024

Г.В. ТИХОМИРОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ «ПЕРЕДОВЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ШКОЛЫ» КАК ИНСТРУМЕНТ ПЕРЕЗАГРУЗКИ ИНЖЕНЕРНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В ВЕДУЩИХ УНИВЕРСИТЕТАХ РОССИИ**

Рассмотрены вопросы реализации Федерального проекта «Передовые инженерные школы», реализация которого началась в 2022 году в рамках государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». НИЯУ МИФИ является методическим оператором данного Проекта. Одной из задач оператора является изучения опыта 50-ти передовых инженерных школ (ПИШ) с целью создания каталога Лучших практик инженерного образования и тиражирования этих практик на все технические университеты России.

G.V. TIKHOMIROV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **THE FEDERAL PROJECT "ADVANCED ENGINEERING SCHOOLS" AS A TOOL FOR RESTARTING ENGINEERING EDUCATION AT LEADING UNIVERSITIES IN RUSSIA**

The issues of the implementation of the Federal project "Advanced Engineering Schools", the implementation of which began in 2022 as part of the state program "Scientific and Technological Development of the Russian Federation", were considered. NRNU MEPhI is the methodical operator of this Project. One of the tasks of the operator is to study the experience of 50 advanced engineering schools (AES) in order to create a catalog of the Best practices of engineering education and replicate these practices to all technical universities in Russia.

Федеральный проект «Передовые инженерные школы» создан в 2022 году по инициативе Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, выполняется в рамках государственной программы «Научно-технологическое развитие Российской Федерации». На конкурсной основе в проект вошли 50 университетов и более 300 высокотехнологичных компаний, которые совместно улучшают инженерное образование в России, а также создают новые технологии и продукты [1]. Основная идея Проекта ПИШ стимулировать активное участие промышленных партнеров в подготовке инженерных кадров новой формации. Практически все ведущие Государственные корпорации и инженерные компании выступили промышленными партнерами ПИШ.

Перед передовыми инженерными школами стоят две взаимосвязанные задачи: создание нового типа инженерной подготовки, а также осуществления прорывных разработок и исследований в интересах высокотехнологичных промышленных партнеров, при участии которых эти школы были созданы. Концепция передовой инженерной школы направлена на то, чтобы изменить саму модель образования в соответствии с запросами времени и обеспечить создание новой инженерно-образовательной среды, построенной вокруг реализации комплексных промышленных проектов, что позволит сформировать новую генерацию инженеров мирового уровня, которые в долгосрочной перспективе обеспечат технологический паритет России.

В течении 2022-2024 годов сотрудники Методического центра «Передовые инженерные школы» НИЯУ МИФИ активно взаимодействуют с ПИШ, изучают их опыт и формируют каталог Лучших практик инженерного образования. Уже отобрано более 100 кандидатов в лучшие практики по различным направлениям деятельности ПИШ включая: образовательные технологии, форматы взаимодействия с промышленными партнерами, специальные образовательные пространства, проекты о области рекламы и профориентации инженерного творчества и др.

Для тиражирования Лучших практик ПИШ в другие технические университеты запланировано проведение различных мероприятий на полях технологических конференций и форумов, издание методической литературы, публикация статей в специализированных журналах и развитие информационной платформы «Современное инженерное образование».

### *Список литературы*

1. <https://engineers2030.ru/> - сайт Федерального проекта «Передовые инженерные школы»

П.Н. РЯБОВ, А.М. ШИЛОВА

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПРОЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕТОДИКИ ПОДГОТОВКИ ИНЖЕНЕРОВ-ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ В УНИВЕРСИТЕТАХ**

В работе рассказывается о концепции проблемно-ориентированного обучения, а также приведены причины, ставшие необходимыми для внедрения данной модели в образовательные программы. Был проведен обзор различных подходов организации проектно-ориентированного обучения в ведущих мировых учебных заведениях, а также их систематизация.

P.N. RYABOV, A.M. SHILOVA

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **PROJECT-BASED LEARNING METHODOLOGIES IN ENGINEERING EDUCATION**

The work describes the concept of problem-oriented learning, as well as the reasons that have become necessary for the implementation of this model in educational programs. A review of various approaches to the organization of project-based learning in the world's leading educational institutions, as well as their systematization, was conducted.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (далее – НИЯУ МИФИ) – это передовая площадка не только для проведения исследований мирового уровня, но и для подготовки исследовательских кадров, способных решать задачи, стоящие перед наукой. С ростом необходимости создавать новые технологии остро возник вопрос об увеличении числа специалистов, способных решать нестандартные и передовые задачи мирового масштаба. На ряду с этим возник вопрос, связанный с организацией образовательной деятельности, целью которой стала бы подготовка таких специалистов. Ответом на данные вопросы в институте ЛаПлаз НИЯУ МИФИ стала интеграция проектно-инженерного модуля в учебные программы бакалавриата. В основе данного модуля лежит технология проблемно-ориентированного обучения, которой посвящена данная работа.

Необходимость в подготовке высококвалифицированных специалистов появилась уже в середине шестидесятих годов, когда ПОО впервые появилось в канадском университете МакМастера. Уже в 1974 году реформы коснулись и инженерного образования: университет Ольборга представил концепцию проектного обучения в инженерном образовании.

Основная схема ПОО, представленная авторами статьи [1], строится следующим образом: небольшим группам студентов предлагается самостоятельно решить определенный набор проектных задач. При внедрении мировыми университетами ПОО в образовательные программы ставились следующие задачи: развитие профессиональных навыков, развитие навыков анализа поставленной задачи, повышение мотивации обучающихся к преподаваемой дисциплине, а также развитие навыков работы в команде и выстраивания межличностных отношений. Систематизируя результаты проделанных работ, было отмечено, что в ходе внедрения ПОО в образовательные программы у обучающихся разных возрастных категорий повышается мотивация к изучаемой дисциплине, а также отмечается повышение результатов относительно классической модели традиционного обучения. Авторы статьи [2] утверждают, что успех использования ПОО в различных образовательных организациях основан на том, что в модели ПОО применяются методики обучения, базированные на принципах когнитивной психологии.

### *Список литературы*

1. Woei Hung // Springer Nature B.V. 2011 Vol.59, P. 2-3.
2. G Henk G. Schmidt, Silvia Mamede // Springer Nature B.V. 2020 Vol. 25, P. 1–2.

А.Д. ЕГОРОВ, А.Г. БОРОДИНА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

## **ВЛИЯНИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТУДЕНЧЕСКИХ КРУЖКОВ НА РАЗВИТИЕ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ**

Рассмотрены некоторые аспекты развития студенческих кружков, научных и технических обществ в Российской Империи, Советском Союзе и Российской Федерации. Показано текущее состояние дел в работе кружков в НИЯУ МИФИ.

A.D. EGOROV, A.G. BORODINA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

## **METHODICAL ERRORS CAUSED BY SUPERPOSITION OF ELECTRICAL AND OPTICAL SIGNALS IN A HETERODYNE LASER INTERFEROMETER**

The work examines some aspects of the development of student circles, scientific and technical societies in the Russian Empire, the Soviet Union and the Russian Federation. The work shows the current state of affairs in the work of circles at the National Research Nuclear University MEPhI.

Первое студенческое научное общество было основано в 1757 году на базе Московского государственного университета [1]. Подробное описание функционирования аналогичного общества приводятся для Студенческого научного общества Харьковского университета [2], основанного в 1825 году. Студенческие научные организации 19-ого века характеризовались в первую очередь тесной связью между преподавателями и студентами, а также утверждением положений на уровне профильного министра. В конце 19-ого, начале 20-ого века начали формироваться технологические студенческие общества. Одним из наиболее ярких примеров таких обществ является кружок «Парящий полёт», а также создававшаяся вокруг него сеть подобных кружков [3]. Эти общества также создавались централизованно, под конкретную задачу, но ключевая особенность такого типа кружков – наличие риска. Финансирование их деятельности осуществлялось промышленностью.

Системная работа по зданию технологических и научных кружков началась в Советском Союзе после окончания ВОВ. Деятельность такого типа объединений была отдана на уровень ВУЗов и регламентирована типовыми положениями. Закономерным был спад внимания к научным и технологическим студенческим кружкам и обществам в 90-ые года. С 2012 года началась постепенная деятельность по восстановлению внимания к студенческим научным кружкам и обществам (СНК и СНО).

Ключевой особенностью сегодняшних СНК и СНО относятся безрисковая модель деятельности, слабая финансовая обеспеченность, самостоятельность в принятии решений о деятельности кружка на уровне кафедр и даже самих студентов.

В НИЯУ МИФИ на сегодня действует 24 СНК и СНО.

### *Список литературы*

1. Blagoev D. *Moi vospominania*. 1928.
2. Parfinenko A., Posohov S. *Stranitsy istorii studencheskoi nauki v Kharkovskom universitete*. 2002.
3. Andryushkov A. <https://journal.kruzhok.org/history/tpost/01enbu5b01-k-istokam-kruzhkovogo-dvizheniya-pervie>