

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

---

**V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО ФОТОНИКЕ И ИНФОРМАЦИОННОЙ  
ОПТИКЕ**

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Москва

УДК 535(06)+004(06)  
ББК 72г  
Н 34

**V МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И  
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,  
2016. – 472 с.

Сборник научных трудов содержит доклады, включенные в программу V Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 3–5 февраля 2016 г. в г.Москве. Тематика конференции охватывает широкий круг вопросов: когерентная и нелинейная оптика, оптика кристаллов, волоконная и интегральная оптика, взаимодействие излучения с веществом и оптические материалы, оптическая связь, цифровая оптика и синтез дифракционных оптических элементов, голография и оптическая обработка информации, оптоэлектронные устройства, прикладная оптика.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 20 ноября 2015 года.  
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2215-8

© Национальный исследовательский  
ядерный университет «МИФИ», 2016

Подписано в печать 25.12.2015. Формат 60×84 1/16.  
Печ. л. 29,5. Тираж 260 экз. Заказ № 168.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Типография НИЯУ МИФИ  
115409, Москва, Каширское ш., 31*

## **ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

### **Председатели:**

- Гуляев Ю.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,  
Москва
- Евтихий Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Альтшулер Г.Б. – Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США
- Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт  
оптико-физических измерений, Москва
- Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Габитов И.Р. – Университет Аризоны, Тусон, США
- Десятников А.С. – Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия
- Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
- Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва
- Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- Криштоп В.В. – Дальневосточный государственный университет путей сообщения,  
Хабаровск
- Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
- Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
- Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Малов А.Н. – Иркутский государственный медицинский университет
- Маломед Б. – Тель-Авивский университет, Израиль
- Манькин Э.А. – Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва
- Нипполайнен Э. – Университет Восточной Финляндии, Куопио, Финляндия
- Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Проклов В.В. – Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,  
Москва
- Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск
- Фетисов Ю.К. – Московский государственный университет информационных  
технологий, радиотехники и электроники
- Фёдоров И.Б. – Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана
- Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

### **Председатель:**

- Петровский А.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Ученый секретарь:
- Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Адрес в Интернет:** <http://fioconf.mephi.ru/>

## СОДЕРЖАНИЕ

КОНОВ В.И., РАЛЬЧЕНКО В.Г., БОЛЬШАКОВ А.П., КОНОНЕНКО Т.В., КОНТЕ Дж. Алмазные детекторы ионизирующего излучения.....	21
АРАКЕЛЯН С.М., КУТРОВСКАЯ С.В., НОГТЕВ Д.С., ОСИПОВ А.В., АНТИПОВ А.А., КУЧЕРИК А.О., ЕМЕЛЬЯНОВ В.И., ВАРТАНЯН Т.А., ЗИМИН С.П. Новые физические принципы создания гибридных элементов фотоники и оптоэлектроники на основе лазерно-индуцированных нанокластерных структур с управляемой топологией.....	22
АЛЬМОХАМЕД Я., БАРИЛЬ Р., ВОДЧИЦ А.И., ВОЙНОВ Ю.П., ГОРЕЛИК В.С., КУДРЯВЦЕВА А.Д., ОРЛОВИЧ В.А., ЧЕРНЕГА Н.В. Вынужденное комбинационное рассеяние света в жидкостях, введенных в поры фотонного кристалла.....	25
ЕКИМОВ Е.А., ЛЯПИН С.Г., БОЛДЫРЕВ К.Н., ГАВВА В.А. GeV: новый центр окраски в алмазе.....	27
БУНКИН А.Ф., ЛОСКУТОВ А.И., ОШУРКО В.Б., ПЕРШИН С.М., ФЕДОРОВ А.Н. Обратный TERS-эффект в слоях метилгидроксиэтилцеллюлозы.....	29
АНЦЫГИН В.Д., ВЛАСОВ М.Ю., МАМРАШЕВ А.А., НИКОЛАЕВ Н.А., ПОТАТУРКИН О.И. Терагерцовые свойства германата свинца в области фазового перехода.....	31
КАПЛУНОВ И.А., НИКИТИН П.А., ВОЛОШИНОВ В.Б. Измерение пропускания германия в инфракрасном и терагерцовом диапазоне.....	33
ШАНДАРОВ С.М., МАНДЕЛЬ А.Е., СМИРНОВ С.В., АКЫЛБАЕВ Т.М., БОРОДИН М.В., АХМАТХАНОВ А.Р., ШУР В.Я. Коллинеарная дифракция некогерентного света на периодической доменной структуре в кристалле ниобата лития.....	35
ТЕПЛЯКОВА Н.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., МАНУКОВСКАЯ Д.В. Эволюция во времени собственных и лазерно-индуцированных дефектов в кристаллах ниобата лития при воздействии лазерного излучения.....	37
НАЛБАНТОВ Н.Н., СТРОГАНОВА Е.В., ГАЛУЦКИЙ В.В. Квантовая эффективность переноса энергии в градиентных лазерных кристаллах Er:Yb:LiNbO <sub>3</sub> .....	39
ДЮ В.Г., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М. Влияние засветки непрерывным лазерным излучением на изменения оптического поглощения в кристалле Bi <sub>12</sub> TiO <sub>20</sub> :Al.....	41
АНДРЕЕВ А.Л., КОМПАНЕЦ И.Н., ЗАЛЯПИН Н.В., СТАРИКОВ Р.С. Управляемое электрическим полем бистабильное рассеяние света в негеликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах.....	43

АЛИЕВ С.А., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К. Исследование оптических свойств гель-пленок диоксида титана с наночастицами золота.....	45
ШИШКИНА К.В., ЛУКАНИН В.И. Особенности нелинейного двухфотонного поглощения в кристаллах вольфраматов и молибдатов.....	47
КУЗЯКОВ Б.А., ТИХОНОВ Р.В. Коррекция работы лазерного канала связи в ближнем космосе при воздействии атмосферных помех.....	49
ЗВЕГИНЦЕВ В.Н., ИВАНОВ С.И., ЛАВРОВ А.П., САЕНКО И.И. Характеристики компонентов макета радиофотонной диаграммоформирующей системы фазированной антенной решетки.....	51
МАЦАК И.С., КАПРАНОВ В.В., КУДРЯВЦЕВ Е.М. Прецизионное вычитание фона при измерении характеристик лазерных пучков.....	53
КУЗЯКОВ Б.А., ТИХОНОВ Р.В. Способы уменьшения влияния турбулентной атмосферы на надежность оптической системы связи.....	55
ЯВОРСКИЙ М.А., БАРИШАК Е.В., АЛЕКСЕЕВ К.Н. Основанная на ОУМ-кодировании устойчивая передача информации с помощью скрученных анизотропных волокон.....	57
СТЕРЛИКОВА Н.С., ФЕДЯНИН Д.Ю. КМОП гибридные плазмонные волноводы: от оптических к плазмонным межсоединениям.....	59
ПРОКЛОВ В.В., БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО О.А., ЛУГОВСКОЙ А.В., ФИЛАТОВ А.Л. Экспериментальное исследование принципа передачи данных в некогерентной оптической линии О-CDMA на основе многополосных акустооптических фильтров.....	61
МОЛЧАНОВ В.Я., ЧИЖИКОВ С.И., ЮШКОВ К.Б. Временное профилирование ультракоротких лазерных импульсов дисперсионным акустооптическим методом.....	63
ЗИНИН П.В., МАЧИХИН А.С., БЫКОВ А.А. Мультимодальный стенд для исследования оптических свойств алмазов.....	65
КУДРЯВЦЕВ Е.М., ЗОТОВ С.Д., РОЩУПКИН В.В. Две модели появления многих акустических событий в стекле («эффект гребенки») во время воздействия CO <sub>2</sub> -лазерного импульса.....	67
ШЕЛЕСТОВ Д.А., ДОЛОНОВ И.А., КОШЕЛЕВ К.И., ПНЕВ А.Б. Хранитель частоты на линии P(16) <sup>13</sup> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> для космического применения.....	69
СЕЛЕЗНЕВ В.А., ДИВОЧИЙ А.В., ВАХТОМИН Ю.Б., МОРОЗОВ П.В., ВАСИЛЬЕВ Д.Д., МОИСЕЕВ К.М., МАЛЕВАННАЯ Е.И., СМИРНОВ К.В. Сверхпроводниковый детектор одиночных ИК-фотонов на основе тонких пленок WSi.....	71

ДОБРЕЦОВА Е.А., БОЛДЫРЕВ К.Н., БОРОВИКОВА Е.Ю., САВОН А.Е., ДЕЙНЕКО Д.В. Оптические и люминесцентные свойства галлиевых боратов со структурным типом хантита.....	73
ВЫШНЕВЫЙ А.А., ФЕДЯНИН Д.Ю. Охлаждение активных плазмонных наноструктур с электрической накачкой.....	75
СУПРУНОВА О.А., ЗАСЕДАТЕЛЕВ А.В., ЧИСТЯКОВ А.А. Размерно-зависимая нелинейная комплексная диэлектрическая проницаемость наночастиц золота.....	77
КОНСТАНТИНОВА Е.И., ЗЮБИН А.Ю., СЛЕЖКИН В.А., БРЮХАНОВ В.В. Спектроскопия комбинационного рассеяния наночастиц серебра на матовой стеклянной поверхности.....	79
ТРЕТЬЯЧЕНКО А.В., КРИВЕНКОВ В.А., ЗВАЙГЗНЕ М.А., МАРТЫНОВ И.Л., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р., ЧИСТЯКОВ А.А. Влияние лазерного излучения на оптические свойства квантовых точек CdSe/ZnS.....	81
АШИККАЛИЕВА К.Х., КОНОНЕНКО Т.В., ОБРАЗЦОВА Е.А., ЗАВЕДЕЕВ Е.В., ХОМИЧ А.А., КОНОВ В.И. Формирование графитовых наноструктур в объеме алмаза под действием фемтосекундного лазерного излучения.....	83
БОЙКОВА А.С., ИЛЬИНА К.Б., МАРЧЕНКОВА М.А., ДЬЯКОВА Ю.А., НАБАТОВ Б.В., ПРОСЕКОВ П.А., СЕРЕГИН А.Ю., ТЕРЕЩЕНКО Е.Ю., КОВАЛЬЧУК М.В. Исследования органических пленок оптическими методами и рентгеновской рефлектометрией.....	85
КУЗНЕЦОВА Ю.О., МАКАРОВ В.И. Применение нанофотосенсибилизатора (наночастиц фталоцианина алюминия) для ранней диагностики и профилактики воспалительных заболеваний.....	87
БЫСТРОВ Ф.Г., МАКАРОВ В.И., ЛОЩЕНОВ В.Б. Исследование кинетики фотолюминесценции наночастиц фталоцианина алюминия в пико- и наносекундном диапазоне в зависимости от pH и при взаимодействии с иммунокомпетентными клетками.....	89
ИЛЬИНА К.Б., МАРЧЕНКОВА М.А., ДЬЯКОВА Ю.А., ВОЛКОВ В.В., ТЕРЕЩЕНКО Е.Ю., БЛАГОВ А.Е., ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., КОВАЛЬЧУК М.В. Исследования начальной стадии кристаллизации белка лизоцима методом малоуглового рентгеновского рассеяния.....	91
РОГОВ П.Ю., БЕСПАЛОВ В.Г. Воздействие фемтосекундных лазерных импульсов на глаза и кожные покровы: математические модели.....	93
МАКЛЫГИНА Ю.С., БОРОДКИН А.В. Разработка волоконно-оптических нейропортов для диагностики и профилактики рецидивов глиобластом.....	95

БРУК М.А., ЖИХАРЕВ Е.Н., РОГОЖИН А.Е., СТРЕЛЬЦОВ Д.Р., КАЛЬНОВ В.А., АВЕРКИН С.Н., СПИРИН А.В. Формирование микро- и наноструктур со скругленным профилем сечения с использованием нового электронно-литографического принципа.....	97
РАХИМОВ Р.А., ОСИПОВ Е.В., ДОВЖЕНКО Д.С., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А. Зависимость спектров отражения ругейт-фильтров на основе пористого кремния от параметров электрохимического травления.....	99
САВЕЛЬЕВ Е.А., ГОЛАНТ К.М. Влияние проплавления на однородность распределения ионов $Yb^{3+}$ и образование кластеров в кварцевом стекле с фосфором, синтезированном методом SPCVD.....	101
ЕРИН Д.Ю., НИЩЕВ К.Н., СЕМЁНОВ С.Л., ЕГОРОВА О.Н., ВЕЛЬМИСКИН В.В. Стекла для активных волоконных световодов, изготовленные методом бесконтейнерной плавки стекла.....	103
КОСОЛАПОВ А.Ф., АЛАГАШЕВ Г.К., КОЛЯДИН А.Н., ПРЯМИКОВ А.Д., БИРЮКОВ А.С., БУФЕТОВ И.А., ДИАНОВ Е.М. Полый световод с уменьшенным диаметром сердцевины и отражающей оболочкой из двойных капилляров.....	105
БУХАРИН М.А., СКРЯБИН Н.Н., ГАНИН Д.В., ХУДЯКОВ Д.В., ВАРТАПЕТОВ С.К. Прямая фемтосекундная запись световодов на малых глубинах залегания под поверхностью кристаллов.....	107
СОСУНОВ А.В., ПОНОМАРЕВ Р.С., ВОЛЫНЦЕВ А.Б. Связь структурных особенностей приповерхностных слоев монокристалла ниобата лития с показателем преломления оптических волноводов.....	109
ЛЕВЧЕНКО К.С., АДАМОВ Г.Е., БАРАЧЕВСКИЙ В.А., ГРЕБЕННИКОВ Е.П., ЗИНОВЬЕВ Е.В., КУРБАНГАЛЕЕВ В.Р., МАЛЫШЕВ П.Б., ПОРОШИН Н.О., ШМЕЛИН П.С., ЧУДОВ К.А. Композиционные материалы, содержащие фотохромные и флуоресцентные соединения, для планарных полимерных волноводов.....	111
БОРОДАКО К.А., ГРИГОРЬЕВ А.А., ШЕЛЯКОВ А.В., СИТНИКОВ Н.Н., ШЕЙФЕР Д.В., ИВАНОВ А.А. Модификация свойств быстрозакаленного сплава TiNiCu при лазерном облучении.....	113
ЗОЛОТОВ Ф.И., ВАХТОМИН Ю.Б., ДИВОЧИЙ А.В., СЕЛЕЗНЕВ В.А., СМИРНОВ К.В. Разработка технологии создания резонаторных структур для увеличения квантовой эффективности NBN детекторов ИК-фотонов.....	115
ХРАМЦОВ И.А., ФЕДЯНИН Д.Ю. Интегрированный медь-германий-медный фотодетектор для кремниевой нанопотоники.....	117

БУРЛАКОВ И.Д., ЕРЕМЧУК А.И., БОЛТАРЬ К.О., ЛОПУХИН А.А., ВЛАСОВ П.В. Матричное фотоприемное устройство на основе эпитаксиальных структур антимонида индия.....	119
ГАБИТОВ И.Р., КУППЕРС Ф., ШКАРАЕВ М.С. Масштабные последствия ничтожных шансов: ошибки в оптоволоконных линиях связи.....	121
ТОЛСТИК А.Л. Динамическая голография и сингулярная оптика.....	123
СУХАРЕВ В.А., ЖУРКОВА И.С., ПЕРЛОВ Д.Д., САДОВСКИЙ А.П. Новый подход к технологии роста кристаллов LBO для лазерного применения.....	126
ДЗЕДОЛИК И.В. Линейные и нелинейные фонон-поляритоны и плазмон-поляритоны в различных средах.....	129
МИНИН И.В., МИНИН О.В. Субволновая оптическая ловушка в поле стоячей волны на основе фотонной струи.....	131
МАКАРОВ В.А., ПЕТНИКОВА В.М., ШУВАЛОВ В.В. Адиабатическая модуляция кноидальной волны солитоном Кузнецова - Ма.....	133
КАЗАНЦЕВА Е.В., МАЙМИСТОВ А.И. Генерация уединенных волн из непрерывного излучения в несимметричном антинаправленном нелинейном волоконном ответвителе.....	135
РЫЖОВ И.В., ВАСИЛЬЕВ Н.А., КОСОВА И.С., ЩЕРБАКОВ С.В., КОВАЛЁВА С.М., ШТАГЕР М.Д., МАЛЫШЕВ В.А. Динамические режимы сверхизлучения ансамбля трёхуровневых $\Lambda$ -атомов в высокодобротном циклическом резонаторе. Бифуркации стационарных точек.....	137
ЛЯШКО Е.И., МАЙМИСТОВ А.И. Направленные моды гиперболического планарного волновода.....	139
БУРИМОВ Н.И., ЗЛОБИН А.О., ШМИДТ А.А., ШАНДАРОВ С.М., ШЕПЕЛЕВИЧ В.В., МАКАРЕВИЧ А.В., КАРГИН Ю.Ф. Флексоэлектрический вклад в фоторефрактивный отклик при попутном взаимодействии световых волн в кристаллах силленитов.....	141
ВАСИЛЬЕВ Е.В., ШЛЕНОВ С.А. Частотно-угловые спектры оптических полей с фазовой дислокацией при самовоздействии в плавленом кварце.....	143
АКИМОВ А.А., ВОРОБЬЕВА Е.В., ИВАХНИК В.В. Пространственные и временные характеристики шестиволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки.....	145
ИВАХНИК В.В., САВЕЛЬЕВ М.В. Четырехволновое взаимодействие в прозрачной наножидкости с учетом пространственной структуры волн накачки.....	147



УШКОВ А.А., ЩЕРБАКОВ А.А. Изочастотные поверхности в трехмерно-периодических диэлектрических искусственных средах.....	149
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Взаимодействие векторных пучков лазерного излучения с конденсированными средами.....	151
КОРОННОВ А.А., САФУТИН А.Е., ЗЕМЛЯНОВ М.М., МАМИН А.В., ЗВЕРЕВ Г.М. Механизм разрушения германиевого лавинного фотодиода вследствие воздействия мощного лазерного излучения.....	153
МАСАЛЬСКИЙ Н.В. Оптический метод определения концентрации жидких растворов аммиака.....	155
АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ЧИСТЯКОВ А.А. Лазерная десорбция следовых количеств слаболетучих взрывчатых веществ.....	157
ВЕДЯШКИНА А.В., ПАВЛОВ И.Н., РИНКЕВИЧЮС Б.С. Определение параметров неоднородных конденсированных сред по положению каустик лазерного излучения.....	159
ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., КОЛЕСНИКОВ С.А., КОЛЕСНИКОВА Е.С., ТУРУТИН Ю.А. Интерферометрический абсорбционный анализ на основе интерференционно-поляризационных фильтров.....	161
СИДОРОВ И.С., ВОЛЫНСКИЙ М.А., МАМОНТОВ О.В., КАМШИЛИН А.А. Изучение воздействия гравитации на лицевое кровоснабжение методом двумерной фотоплетизмографии.....	163
ВЕРЕНИКИНА Н.М., КОВАЛЕВ М.С., КОЛОСОВА Е.С. Бесконтактное измерение спектральной чувствительности глаза в расширенном диапазоне длин волн.....	165
АНДРЕЕВА Н.В., КУЗЬМИНА Т.Б., АНДРЕЕВА О.В. Исследование плазмонного резонанса в проявленных голографических фотоматериалах.....	167
ПАВЛОВ И.Н., РИНКЕВИЧЮС Б.С., ТОЛКАЧЕВ А.В., ВЕДЯШКИНА А.В. Исследование возможностей метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации процессов в пристеночном слое жидкости.....	169
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ В.В., ТУАН Ф.А. Исследование динамических характеристик микрооптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей.....	171
КОРОБКОВ В.В., ЛВИН Н.Т. Методика расчета преобразователя ускорений на основе оптического туннельного эффекта.....	173
БУСАРОВ А.С., ВИНОГРАДОВ А.В., ПОПОВ Н.Л. Когерентная рентгеновская микроскопия при наклонном освещении отражающих объектов.....	175

ГРАЧЕВ Я.В., КУЗЬМИНА А.В., БЕСПАЛОВ В.Г. Влияние времени сканирования на характеристики измеряемого сигнала в системах импульсной терагерцевой спектроскопии.....	177
БУТЬ А.И., ЛЯВШУК И.А., ЛЯЛИКОВ А.М., ЯНИЧКИН В.В. Оптическая обработка снимков расфокусированных решеток при визуализации оптических неоднородностей фазового объекта.....	179
ЕРМОЛАЕВ П.А., ВОЛЫНСКИЙ М.А., ВОЛКОВ М.В., СЕМЕНКОВ К.П., МАРГАРЯНЦ Н.Б. Анализ видеоданных для исследования поведения микроскопических объектов.....	181
ШЕВКУНОВ И.А., ПЕТРОВ Н.В., КАТКОВНИК В.Я. Восстановление волнового фронта при использовании разреженного представления об амплитуде и абсолютной фазе объекта.....	183
ИРТУГАНОВ Н.Н., АРТЮКОВ И.А. Методы нелинейной фильтрации шумов при микротомографическом исследовании малоконтрастных объектов.....	185
ВОБК Т.А., НИКОЛАЕВА Т.Ю., ПЕТРОВ Н.В. Калибровка метода оценки объема с частицами на основе отношения пика корреляционной функции к пьедесталу.....	187
ДУДЕНКОВА В.В., ЗАХАРОВ Ю.Н. Совмещение BaLM и голографического методов в одной оптической схеме для получения сверхвысокого разрешения при изучении полупрозрачных объектов.....	189
БЫКОВСКИЙ А.Ю. Многокритериальная оптимизация в процедурах построения многозначно-логической модели агента.....	191
ИВАНОВ П.А. Инвариантные корреляционные фильтры в задачах распознавания геометрически искаженных изображений.....	193
ПЕТРОВА Е.К., СТАРИКОВ Р.С., ШАУЛЬСКИЙ Д.В. Моделирование инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений объектов в условиях поворота.....	195
ДАВЫДОВА М.Г., КОРОЛЕНКО П.В., РЫЖИКОВА Ю.В., ФЕДОРОВ С.А. Скейлинг в характеристиках квазипериодических структур с симметрией самоподобия.....	197
БОБРЕШОВ А.М., ЗОЛОТУХИН Е.В., КОШЕЛЕВ А.Г. Органический многоканальный светодиод как дисплей кругового излучения.....	199
КАПЫРИН Н.И., КОЛДАСОВА С.К. Язык формального описания оптических эффектов для моделирования фотограмметрической аппаратуры.....	201

КУТАНОВ А.А., СНИМЩИКОВ И.А., НУРБЕК С.У., ВЕЛИКАСОВ С.С., МАКАРОВ В.П. Интерференционные спектральные фильтры на пленках аморфного кремния и прямая лазерная запись на них.....	203
ЯНОВСКИЙ А.В. Комбинированная защитная голограмма с объёмным представлением аналогового изображения.....	205
ПАВЛОВ А.В. Обобщение серии образов наложенными голограммами Фурье.....	207
КОВАЛЕВ М.С., КРАСИН Г.К., МАЛИНИНА П.И., ОДИНОКОВ С.Б. Датчик волнового фронта на основе голограммных оптических элементов...	209
ДЁМИН В.В., КАМЕНЕВ Д.В. Извлечение информации из цифровых голограмм частиц. Результаты и перспективы.....	211
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КУРБАТОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А. Методы сжатия информации о 3D-сценах с помощью цифровой голографии.....	213
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В. Применение входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением.....	215
ЧИПЕГИН А.А., ПУТИЛИН С.Э., ПЕТРОВ Н.В. Голография сфокусированного изображения для исследования сверхбыстрых процессов.....	217
ДЁМИН В.В., КОЗЛОВА А.С. Определение положения частиц по цифровой голограмме без восстановления на основе метода Виолы-Джонса.....	219
САВОНИН С.А., РЯБУХО В.П. Применение математического моделирования при численной коррекции микронаклонов объекта в цифровой голографической интерферометрии.....	221
МОСЕЙКО Д.В., МАНУХИН Б.Г., АНДРЕЕВА О.В. Температурные эффекты в полимерных голографических средах.....	223
БЕТИН А.Ю., ГРАД Я.А., НИКОЛАЕВ В.В., ОДИНОКОВ С.Б., СОЛОМАШЕНКО А.Б. Голографический индикатор на основе рельефно-фазовых дифракционных решеток.....	225
РОГАЛИН В.Е., АШКИНАЗИ Е.Е., ПОПОВИЧ А.Ф., РАЛЬЧЕНКО В.Г., КОНОВ В.И., КАМЕНЕВ В.Г., АРАНЧИЙ С.М., РУЗИН М.В., УСПЕНСКИЙ С.А. Поведение водоохлаждаемых оптических элементов из поликристаллического алмаза при экстремальных плотностях мощности непрерывного лазерного излучения.....	227
МАРЦЫНЮКОВ С.А., ЧЕРНИГОВСКИЙ В.В., КОСТРИН Д.К., ЛИСЕНКОВ А.А. Исследование фазовых превращений в материалах с помощью нагрева лазерным излучением.....	229

ВЕЙКО В.П., КАРЛАГИНА Ю.Ю., ОДИНЦОВА Г.В., АГЕЕВ Э.И., АНДРЕЕВА Я.М., РОМАНОВ В.В.	
Исследование зависимости спектров отражения от угла падения света на поверхность металлов, окисленную волоконным лазером.....	231
ЧИСТЯКОВ А.А., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., КРИВЕНКОВ В.А., МИТЯГИН Ю.А., ПИРЯЗЕВ И.Н.	
Исследование зависимостей фототока и мощности терагерцового излучения фотопроводящих антенн на основе LT-GaAs от геометрии фокусировки и параметров излучения фемтосекундного лазера.....	233
МАРЦЫНЮКОВ С.А., ЧЕРНИГОВСКИЙ В.В., КОСТРИН Д.К., ЛИСЕНКОВ А.А.	
Исследование инерционности системы управления мощностью излучения газоразрядных лазеров.....	235
РОГАЛИН В.Е., КУГАЕНКО О.М., АШКИНАЗИ Е.Е., АНДРЕЕВА М.С.	
Модификация поверхности оксидированного алюминия воздействием импульса CO <sub>2</sub> -лазера.....	237
ОДИНЦОВА Г.В., ВЛАСОВА Е.А., КОПЫТОВ С.М., ЯЦУК Р.М., КАРЛАГИНА Ю.Ю., АНДРЕЕВА Я.М.	
Влияние лазерного окисления на адгезию титановых пленок к поверхности серебряных изделий.....	239
МАКИН В.С., МАКИН Р.С.	
Обработка материалов радиальнополяризованным излучением.....	241
ГАНИН Д.В., ЛАПШИН К.Э., ОБИДИН А.З., ВАРТАПЕТОВ С.К.	
Метод высокоэффективной прецизионной резки биоразлагаемых коронарных стендов и прозрачных материалов фемтосекундными лазерами.....	243
ВОВЧЕНКО Е.Д., МЕЛЕХОВ А.П.	
Влияние параметров лазерного излучения на эмиссионные свойства лазерно-иницируемой вакуумной искры.....	245
БАЗЗАЛ Х., ФАДАИЯН А.Р., ВОРОПАЙ Е.С., ЗАЖОГИН А.П.	
Исследования процессов образования радикалов AlO в плазме при воздействии двоекных лазерных импульсов на алюминиевый сплав D16T в атмосфере воздуха.....	247
ШТАРЕВ Д.С., ШТАРЕВА А.В., ДОРОНИН И.С., БЛОХ А.И., СЮЙ А.В.	
Оптические и каталитические свойства висмутатов щелочно-земельных металлов.....	249
ЧЕРНОВ А.И., ФЕДОТОВ П.В., ОБРАЗЦОВА Е.Д.	
Гибридные материалы на основе одностенных углеродных нанотрубок и полос графена для фотоники.....	251
АДАМОВ Г.Е., ЛЕВЧЕНКО К.С., КУРБАНГАЛЕЕВ В.Р., ПОРОШИН Н.О., ГРЕБЕННИКОВ Е.П.	
Получение и исследование двумерных наноструктур на основе модифицированного фуллерена C <sub>60</sub> , связанных фотоуправляемым спейсером.....	253

МАЙОР А.Ю., ПРОЦЕНКО Д.Ю., ЩИПУНОВ Ю.А., ПОСТНОВА И.В. Оптические характеристики коллоидов углеродных квантовых точек.....	255
БОЛДЫРЕВ К.Н., МОЛЧАНОВА А.Д., КУЗЬМИН Н.Н. Новые магнитооптические явления в $\text{CuV}_2\text{O}_4$ .....	257
ИЛЬИНСКИЙ А.В., КАСТРО Р.А., НАБИУЛЛИНА Л.А., ПАШКЕВИЧ М.Э., ШАДРИН Е.Б. Магнитооптика нелегированного силиката висмута.....	259
КУДРЯВЦЕВ Е.М., ЗОТОВ С.Д., ЛЕБЕДЕВ А.А., РОЩУПКИН В.В. Медленные солитоноподобные упругие волны в металле: новый пример наблюдения и применение.....	261
ЯРЕМЕНКО Н.Г., СТРАХОВ В.А., КАРАЧЕВЦЕВА М.В. Осцилляции времени захвата дырок в квантовые ямы гетероструктур $n\text{-AlGaAs/GaAs}$ .....	263
НИКОНОВ А.В., ЯКОВЛЕВА Н.И., БОЛТАРЬ К.О., ПОНОМАРЕНКО В.П. Исследование спектральных характеристик многослойных гетероэпитаксиальных слоёв ИК-диапазона.....	265
КУЛЯХТИНА Н.М., НИКОНОВ А.В., ЯКОВЛЕВА Н.И., ПОНОМАРЕНКО В.П. Оптические характеристики гетероэпитаксиальных слоёв соединений группы АЗВ5.....	267
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Природа формирования аномальных решеток с субдифракционными пространственными периодами.....	269
КОТЛИКОВ Е.Н., ЮРКОВЕЦ Е.В. Коррекция оптических спектров пленок на поглощающей подложке.....	271
АСЕЕВ В.А., БИБИК А.Ю., КОЛОБКОВА Е.В., НИКОНОРОВ Н.В. Структурные и спектрально-люминесцентные свойства фторсодержащих наностеклокерамик, активированных эрбием.....	273
СТРОКОВА Ю.А., СВЯХОВСКИЙ С.Е., САЛЕЦКИЙ А.М. Безызлучательный межмолекулярный перенос энергии в одномерном фотонном кристалле на основе пористого кремния.....	275
ОСИПОВ Е.В., МАРТЫНОВ И.Л., ДОВЖЕНКО Д.С., КОТКОВСКИЙ Г.Е., ЧИСТЯКОВ А.А. Тушение фотолюминесценции сопряженных полимеров, внедренных в микрорезонатор из пористого кремния, под действием паров нитроароматических соединений.....	277
ЛИПАТОВА Ж.О., КОЛОБКОВА Е.В., НИКОНОРОВ Н.В. Люминесценция молекулярных кластеров и квантовых точек селенида кадмия во фторфосфатных стеклах.....	279
ДОВЖЕНКО Д.С., ОСИПОВ Е.В., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А. Исследование усиления спонтанного излучения люминофоров в фотонных кристаллах как эффективный способ увеличения чувствительности сенсоров на их основе.....	281

СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., КОСТРИЦКИЙ С.М., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ВАСИЛЬЕВА В.В., ЧИРКОВА И.М.	
Фотолюминесценция в легированных кристаллах ниобата лития.....	283
ПАНТЕЛЕЙ Е., ПАРАНИН В.Д.	
Спектры пропускания и отражения ниобата лития в области от 190 до 25000 нм.....	285
ИЛЛАРИОНОВ А.И., ИЛЛАРИОНОВА Е.А., НИКОНОВИЧ О.Л.	
Оптические и нелинейно-оптические свойства рифампицина.....	287
ДЁМИН В.В., ПОЛОВЦЕВ И.Г., КАМЕНЕВ Д.В.	
Устройство контроля качества монокристаллов $ZnGeP_2$ .....	289
УМРЕЙКО Д.С., ЗАЖОГИН А.П., КОМЯК А.И.	
Особенности влияния кислорода на процессы фотохимического образования нанокластеров урана переменной валентности в растворах уранилперхлората в ацетоне.....	291
МОГИЛЬНЫЙ В.В., СТАНКЕВИЧ А.И., ТРОФИМОВА А.В.	
Фоточувствительная композиция для фотоориентации ЖК материалов.....	293
ГОРЯЕВ М.А.	
Сенсибилизация внутреннего фотоэффекта в кремнии красителями.....	295
САПАРИНА С.В., ХАРИНЦЕВ С.С., АЛЕКСЕЕВ А.М.	
Возможности спектроскопии комбинационного рассеяния и ИК-микроскопии для визуализации бинарных полимеров с субволновым пространственным разрешением.....	297
ЧЕРНЫХ Е.А., ХАРИНЦЕВ С.С., АЛЕКСЕЕВ А.М.	
Экспериментальное исследование поверхностной морфологии композитного полимера РТВ7:PC71ВМ:DIО с помощью плазмонной микроскопии высокого разрешения.....	299
ГОНЧАРУК И.Н., ИЛЬИНСКИЙ А.В., ПОПОВА И.О., ШАДРИН Е.Б.	
Проявление корреляционного взаимодействия электронов в спектрах комбинационного рассеяния света кристаллами диоксида ванадия.....	301
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ТРЕГУБ Н.В., СЕЛЕЗНЕВА Е.А., АСАДОВА А.А.	
Исследование загрязнений окружающей среды тяжелыми металлами с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния.....	303
ЕГОРЫШЕВА А.В., ДУДКИНА Т.Д., ГАЙТКО О.М., РУДНЕВ П.О.	
Синтез фотокатализатора видимого диапазона на основе сложного оксида висмута.....	305
ФАРРАХОВА Д.С., КУЗНЕЦОВА Ю.О., ЛОЩЕНОВ В.Б.	
Лазерно-индуцированная флюоресцентная диагностика ранней стадии кариеса с применением наночастиц фталоцианина алюминия.....	307
ШАРОВА А.С., МАКЛЫГИНА Ю.С., ЛОЩЕНОВ В.Б.	
Бактериохлорин в роли ИК-фотосенсибилизатора для диагностики и терапии глубокозалегающих опухолей мозга.....	309
ШАДРИН Е.Б., ИЛЬИНСКИЙ А.В., КАПРАЛОВА В.М., САМОЙЛОВ В.О.	
Магнитооптика ионов $Fe^{2+}$ в гемоглобине.....	311

ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., РОЗЕНБАУМ А.Ю., КУЛАБУХОВА А.Ю. Анализ тканей зубов с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния.....	313
ТИМЧЕНКО Е.В., ТИМЧЕНКО П.Е., ВОЛОВА Л.Т., ШАЛКОВСКАЯ П.Ю., ПЕРШУТКИНА С.В. Оценка биотканевых имплантатов методом спектроскопии комбинационного рассеяния.....	315
МЯСОЕДОВА И.А., САЛМИН В.В., САЛМИНА А.Б. Голография и синтез микроструктур биополимеров для решения биомедицинских и биотехнологических задач.....	317
ДУДОВА Д.С., МИНАЕВ Н.В. Создание трехмерных структур из биосовместимых композиций на основе хитозан-хитина методом 3D печати.....	319
ГАНИН Д.В., ЛАПШИН К.Э., ОБИДИН А.З., ВАРТАПЕТОВ С.К. Формирование линейных графитизированных микроструктур в объеме поликарбоната с помощью ультракоротких импульсов.....	321
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. «Переключение» пространственного периода резонансных решеток, формируемых сканируемым фемтосекундным излучением в стекле.....	323
МАКИН В.С., ЛОГАЧЕВА Е.И. Неустойчивости хрупкого разрушения стекла сканирующим лазерным излучением.....	325
ЛЕВЧЕНКО А.С., ФРОЛОВ Д.Р., БАБЕНКО А.А., НИКИФОРОВ Н.Д., КОРОТКОВ К.С., РУДОМАН А.Н. Получение S-параметров двунаправленного электрооптического четырёхполосника.....	327
КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М. Электрооптическая эффективность фазовых модуляторов на основе протонообменных $\text{LiNbO}_3$ волноводов.....	329
ВЕКШИН М.М., КУЗЬМЕНКО А.Д., НИКИТИН В.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Измерение оптических потерь в заглубленных $\text{Ag}^+$ -волноводах в стекле К-8.....	331
БАБКИН О.Э., ИЛЬИНА В.В., МЕЛИДИНА А.А. Разработка материала для цветового кодирования оптоволоконных кабелей.....	333
КУЗЯКОВ Б.А. Перспективные методы реализации орбитальных угловых моментов фотонов в оптических телекоммуникационных линиях.....	335
ПЛЁНКИН А.П. Повышение защищенности алгоритма обнаружения фотонного импульса в системе квантового распределения ключа.....	337

ПЛИВАК С.А., ШУМИЛИН А.С. Защищенная система передачи данных на основе VLC-технологии.....	339
ИЛБЯСОВА А.А., РЫБАСЬ А.Ф., ХАЛИЛОВ С.И. Экспериментальное исследование процесса мультиплексирования сигнала в пучке, переносящего оптические вихри после прохождения маломодового волокна.....	341
ХАЛИЛОВ С.И., РЫБАСЬ А.Ф. Экспериментальное исследование процесса демultipлексирования сигнала в пучке, переносящего оптические вихри после прохождения оптического маломодового волокна.....	343
ЗАЧИНЯЕВ Ю.В., ПЛИВАК С.А., ШУМИЛИН А.С. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления фазовой самомодуляции.....	345
ПОГРЕБНАЯ А.О., РЫБАСЬ А.Ф. Фазовая структура пучка переносящего оптический вихрь с дробным топологическим зарядом в одноосном кристалле.....	347
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С. Разработка математической модели радиофотонной системы измерения сигнала, использующей растяжение сигнала по времени.....	349
МИНИН И.В., МИНИН О.В. Мезофотоника изолированных и кластера самоподобных трехмерных диэлектрических частиц.....	351
ВАСИЛЬЕВ С.В., ЖАРКИЙ Н.В., ИВАНОВ А.Ю. Экспресс-диагностика динамики роста кратера при лазерной обработке материалов.....	353
БОЙЧЕНКО А.П., СЕВРЮКОВ С.Ю., ОВЕЧЕНКО Д.С. О возможности генерации мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучений барьерным разрядом за счет эффекта убегания электронов.....	355
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И. Модуляционная неустойчивость волновых пакетов, распространяющихся в среде с бегущей волной показателя преломления.....	357
ЛИТВИНОВА В.А., ЛИТВИНОВА М.Н., КАРПЕЦ Ю.М. Генерация второй гармоники в легированных волокнах с периодически наведенной нелинейностью.....	359
ИЛЛАРИОНОВ А.И., ИВАНОВ М.С., ГОРЕВА О.В. Влияние параметров оптической системы, обладающей сферической aberrацией, на структуру второй оптической гармоники.....	361
ИВАНОВ В.И., ИВАНОВА Г.Д., ХЕ В.К. Светоиндуцированная псевдопризма в наносуспензии.....	363
ИВАНОВА С.В. Рассеяние лазерного излучения нелинейным кристаллом в дальнем поле.....	365



СЕМЕНОВА Л.Е. Гиперкомбинационное рассеяние света в CdS вблизи резонанса с $A_{n=1}$ экситоном.....	367
ЛИВАШВИЛИ А.И., КРИШТОП В.В., КОСТИНА Г.В. Концентрационные волны переключения в наножидкости, находящейся в световом поле.....	369
ГАДОМСКИЙ О.Н., ЩУКАРЕВ И.А. Маскировка тел методом обтекания светом тел, покрытых композитным слоем с квазинулевым показателем преломления.....	371
АВЕРБУХ Б.Б., АВЕРБУХ И.Б. Среда из электрических диполей, имеющая единичный или нулевой показатели преломления.....	373
КАРЦЕВ П.Ф., КУЗНЕЦОВ И.О. Динамика процесса аннигиляции позитрония в состоянии бозе-конденсата..	375
АСТАШКЕВИЧ С.А. Информационные неравенства для колебательных состояний двухатомной молекулы.....	376
БАБЕНКО И.Д., БАРБАНАКОВА Ю.А., ГАЛУЦКИЙ В.В., СТРОГАНОВА Е.В., ЯКОВЕНКО Н.А. Моделирование коэрцитивного поля в градиентном кристалле ниобата лития.....	378
ДМИТРИЕВ Е.А., БЕРЕЗИНА Е.А., КРАДЬКО В.А., РЯБЧЁНОК В.Ю., ПЕРИН А.С., ШАНДАРОВ В.М. Исследование пространственной неоднородности фоторефрактивных свойств кристалла ниобата лития.....	380
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Интерференция света в монокристаллах $LiNbO_3:Er$ .....	382
ГОРЕВА О.В. Формирование нелинейного отклика кристаллов при векторном взаимодействии световых волн.....	384
ГАРИФУЛЛИН А.И., ХАМАДЕЕВ М.А., ГАЙНУТДИНОВ Р.Х. Вычисление дисперсионных соотношений в фотонных кристаллах методом плоских волн и методом матриц распространения.....	386
СЕМКИН А.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н., ДОЛГИРЕВ В.О., СОН Д.И., СОН С.И. Фотоиндуцированное изменение состояния поляризации лазерного излучения в ЖК ячейке с полимерным фотоориентантом.....	388
ПИКУЛЬ О.Ю., КОВАЛЕНКО Л.Л. Коноскопические картины кристаллической кварцевой пластинки $\lambda/4$ .....	390
ИЛЛАРИОНОВ А.И. Определение аберраций фокусирующих линз нелинейно-оптическим методом.....	392
ГАРНАЕВА Г.И., НЕФЕДЬЕВ Л.А., САХБИЕВА А.Р. Преобразование изображения транспаранта внешними электромагнитными стоячими волнами в оптической эхо-голографии.....	394

БУБИС Е.Л., ЛОЖКАРЕВ В.В., СТЕПАНОВ А.Н., СМИРНОВ А.И., МАРТЫНОВ В.О., МАЛЫШАКОВА О.А., СИЛИН Д.Е., ГУСЕВ С.А. Относительно инвертирования изображения мелкомасштабного непрозрачного объекта при фокусировке освещающего его пучка в поглощающую среду.....	396
ЧЕРНЯК М.Е., МЕХОВСКИЙ Е.А., УЛАНОВА А.В. Анализ эффекта увеличения темнового сигнала ПЗС-матрицы с межстрочным переносом при гамма-облучении.....	398
УХОВ А.А., КОСТРИН Д.К., ГЕРАСИМОВ В.А., СЕЛИВАНОВ Л.М. Подавление интерференции в структуре ПЗС-фотоприемников.....	400
МИТРОФАНОВ С.С., ПОВАРОВ К.С. Исследование точностных характеристик кругового фотоприемника "Мультискан".....	402
НАСТУЛЯВИЧУС А.А., ПОПОВА Е.В., СТИФУТКИН А.А., БУЖАН П.Ж., ИЛЬИН А.Л., МАВРИЦКИЙ О.Б., ЕГОРОВ А.Н. Применение ультракоротких лазерных импульсов для исследования временных характеристик кремниевых фотоумножителей.....	404
КАЛАШНИКОВ Е.В. Цифровой поляризационный интерферометр.....	406
БУСУРИН В.И., ВИН Й.Н., СЕМУШЕВА С.М. Анализ влияния деформации кольцевого резонатора на результаты измерения угловой скорости.....	408
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ К.А. Система поддержки принятия решения пилотом при движении на аэродроме.....	410
ПОЛЯКОВ А.В. Оптоэлектронная периметровая система охраны.....	412
ГОЛУБЕВ К.А., КАЛАШНИКОВ Е.В., ЧАРУХЧЕВ А.В. Видеоизмерительная система рабочего места сборки деталей.....	414
БАРЫШНИКОВ Н.В., ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е., САХАРОВ А.А. Метод и аппаратура аттестационного контроля радиусов кривизны сферических поверхностей оптических изделий при помощи датчика волнового фронта.....	416
ВОЛЫНСКИЙ М.А., СИДОРОВ И.С., КАМШИЛИН А.А. Влияние поляризации света на его модуляцию во времени при взаимодействии с живой тканью.....	418
БЕЛАВЕНЦЕВА А.В., РОМАШКО Р.В., КУЛЬЧИН Ю.Н., КАМШИЛИН А.А. Исследование процессов термической релаксации живых тканей методом визуализации пульсации крови.....	420
УХОВ А.А., КОСТРИН Д.К., ГЕРАСИМОВ В.А., СЕЛИВАНОВ Л.М. Оптимизация методики определения толщины тонких оптически прозрачных пленок.....	422

ЧИГРИН Р.Н., АНДРЕЕВА Н.В., АНДРЕЕВА О.В. Исследование фазовых изменений в процессе хранения тонкодисперсных водных суспензий неорганических веществ.....	424
БАЛБЕКИН Н.С., КУЛЯ М.С., ГОРОДЕЦКИЙ А.А., НОВОСЕЛОВ Е.В., ПЕТРОВ Н.В. Моделирование широкополосных импульсных голограмм с шумом.....	426
БОРОДИН А.Н. Расчет характеристик оптического фильтра с угловым селективным пропусканием.....	428
ЕВТИХИЕВ Н.Н., ПЕТРОВА Е.К., ПЯНКОВ С.С., СТАРИКОВ Р.С., ШАУЛЬСКИЙ Д.В. Исследование возможностей синтеза инвариантных корреляционных фильтров на базе искусственных настроенных наборов, полученных путём манипуляции характеристиками реальных изображений.....	430
ПАВЛОВ П.В., МАЛОВ А.Н., НЕУПОКОЕВА А.В., НИКОЛАЕВА Т.Ю., ПЕТРОВ Н.В. Идентификация частиц в объеме методами пороговой обработки и «шахматной доски».....	432
ПАВЛОВ П.В., ЛАГОШНЫЙ И.С., МАЛОВ А.Н., НЕУПОКОЕВА А.В. Определение шероховатости по параметрам спекл-изображений методом «шахматной доски» .....	434
ВОЛКОВ М.В., ВИНОГРАДОВ Ю.В. Восстановление смещений поверхности объекта с использованием интерференционных методов фазового сдвига.....	436
ТАЛАЙКОВА Н.А., РЯБУХО В.П. Компактная схема дифракционного фазового микроскопа для трехмерной визуализации фазовых объектов.....	438
БЕЛАШОВ А.В., ПЕТРОВ Н.В., СЕМЕНОВА И.В. Случайные и систематические ошибки в цифровой голографической томографии.....	440
КАМЕНЕВ Д.В., СИНИЦЫН А.А. Исследование изменений размеров и пространственного положения частиц, вызванных использованием сферического волнового фронта на этапе регистрации голограммы.....	442
МУРАВЬЕВА М.С., ЗАХАРОВ Ю.Н. Анализ процесса записи и реконструкции голограмм в системе сканирующей голографической микроскопии.....	444
БЕЛЯВЦЕВ А.Ю., ЧИГРИН Р.Н., ПАНЧЕНКО А.В., АНДРЕЕВА Н.В., ТЫНДЫК М.Л., АНДРЕЕВА О.В. Использование цифровой голографической интерферометрии для оценки фазовых изменений прозрачных биоматериалов.....	446

БОНДАРЕВА А.П., ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., МОЛОДЦОВ Д.Ю., ЧЕРЁМХИН П.А., ЭРЬКИН И.Ю.	
Оптическое кодирование серии изображений с использованием набора кодирующих ключей в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух ЖК ПВМС.....	448
НАЛЕГАЕВ С.С., КРАСНОВ В.В., ПЕТРОВ Н.В.	
Система аутентификации коммерческих технических устройств с использованием асимметричного голографического кодирования изображений.....	450
БЕРДЫШЕВА С.А., КРАСНОВ В.В., НАЛЕГАЕВ С.С., СТАРИКОВ Р.С.	
Оптическое кодирование цифровой информации в виде QR-кодов в пространственно-некогерентном монохроматическом свете.....	452
КУЛАКОВ М.Н., ПОРШНЕВА Л.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Расчет киноформов объемных сцен методом «пинг-понг».....	454
ПЕТРОВ Н.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ШЕВКУНОВ И.А.	
Использование спектральной информации при восстановлении цветных цифровых голограмм “на отражение”.....	456
ДЁМИН В.В., КОЗЛОВА А.С.	
Определение положения частиц по цифровой голограмме без восстановления на основе метода Виолы-Джонса.....	458
КУРБАТОВА Е.А., КРАСНОВ В.В., МОЛОДЦОВ Д.Ю., ПОРШНЕВА Л.А., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.	
Методика моделирования записи и оптического восстановления изображений с цифровых голограмм.....	460
КОЛЮЧКИН В.В., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ОДИНОКОВ С.Б., ТАЛАЛАЕВ В.Е., ЦЫГАНОВ И.К.	
Оптико-электронный прибор контроля подлинности голограмм на паспортных документах.....	462
МОЛОДЦОВ Д.Ю., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.	
Влияние погрешностей DMD-модуляторов на качество восстановления фурье-голограмм.....	464
Именной указатель авторов.....	466

В.И. КОНОВ<sup>1,2</sup>, В.Г. РАЛЬЧЕНКО<sup>1,2</sup>, А.П. БОЛЬШАКОВ<sup>1,2</sup>,  
Т.В. КОНОНЕНКО<sup>1,2</sup>, Дж. КОНТЕ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

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

<sup>3</sup>*Третий римский университет, Италия*

## **АЛМАЗНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Представлены варианты и параметры детекторов излучения различного спектрального диапазона, на основе алмазов, синтезированных из газовой фазы.

V.I. KONOV<sup>1,2</sup>, V.G. RALCHENKO<sup>1,2</sup>, A.P. BOLSHAKOV<sup>1,2</sup>,  
T.V. KONONENKO<sup>1,2</sup>, G. CONTE<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*National research nuclear university MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

<sup>3</sup>*University Roma Tre, Rome, Italy*

## **DIAMOND RADIATION DETECTORS**

Designs and parameters of CVD diamond detectors for radiation of different spectral ranges are presented and discussed.

Развитие техники синтеза особо чистых алмазных пленок и монокристаллов из газовой фазы (CVD-метод) позволило получать материал для радиационно-стойких детекторов УФ и рентгеновского излучений, а также частиц высоких энергий. В докладе будут изложены принципы выращивания в СВЧ плазме в смесях метан-водород поликристаллических алмазных пластин большого размера (>50 мм в диаметре) и монокристаллов алмаза, а также представлены варианты детекторов на их основе. Среди них: (а) солнечно-слепые УФ-детекторы с соотношением фотооткликов в УФ-области и видимой более пяти порядков величины; (б) матричные детекторы рентгеновского излучения для имиджинга, в том числе с графитизированными массивами контактов, создаваемых лазерной абляцией; (в) полупрозрачные для излучения алмазные мембранные сенсоры. В заключение будет рассмотрен новый тип «трехмерных» детекторов, в которых массив заглубленных нитевидных электродов создается локальной графитизацией в объеме под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

С.М. АРАКЕЛЯН, С.В. КУТРОВСКАЯ, Д.С. НОГТЕВ,  
А.В. ОСИПОВ, А.А. АНТИПОВ, А.О. КУЧЕРИК,  
В.И. ЕМЕЛЬЯНОВ<sup>1</sup>, Т.А. ВАРТАНЯН<sup>2</sup>, С.П. ЗИМИН<sup>3</sup>

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>3</sup>*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова*

## **НОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ НАНОКЛАСТЕРНЫХ СТРУКТУР С УПРАВЛЯЕМОЙ ТОПОЛОГИЕЙ**

Лазерный синтез наночастиц/нанокластеров различного состава в полупроводниковых образцах (PbTe) и биметаллических пленках (Au-Ag) проведен на основе двух схем лазерной абляции: прямой лазерной модификации тонких пленок и лазерного испарения вещества из мишени в жидкости для получения коллоидных систем с последующим осаждением частиц из коллоида на твердую подложку. В подобных структурах оказывается возможным управление оптическими и электрофизическими свойствами в требуемом направлении при модификации параметров/топологии индуцированных структур. Данный подход является принципиальным для создания элементов и устройств оптоэлектроники и фотоники на новых физических принципах в гибридных схемах.

S.M. ARAKELIAN, S.V. KUTROVSKAYA, D.S. NOGTEV,  
A.V. OSIPOV, A.A. ANTIPOV, A.O. KUCHERIK,  
V.I. EMEL'YANOV<sup>1</sup>, T.A. VARTANYAN<sup>2</sup>, S.P. ZIMIN<sup>3</sup>

*Stoletovs Vladimir State University*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow state university*

<sup>2</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>3</sup>*P.G. Demidov Yaroslavl state university*

## **NEW PHYSICAL PRINCIPLES TO CREATETHE HYBRID ELEMENTS OF PHOTONICS AND OPTOELECTRONICS BY LASER-INDUCED NANOCLUSTER STRUCTURES WITH CONTROLLED TOPOLOGY**

The laser synthesis technique to produce the nanoparticles/nanoclusters of different composition in both semiconductor samples (PbTe) and bimetallic film (Au-Ag) is presented by two laser ablation methods consequently: direct laser modification of thin

films and laser evaporation of substance from target in liquid to produce the colloidal system and subsequent deposition of particles from colloid on solid substrate. The optical and electro-physical properties of the induced structures can be controlled by various induced topology. Such approach is very principal to construct the elements and devices of optoelectronics and photonics in hybrid circuits on new physical principles.

Для физических процессов в наноструктурированных материалах проявляются три типа эффектов. Первое – это квантоворазмерные эффекты для нанобъектов с размерами, сравнимыми с длиной волны де-Бройля (для нанокластеров размером  $\sim 10$  нм, с поверхностной плотностью  $\geq 10^{11} \text{см}^{-2}$ ). Второе – поверхностные эффекты (включая дефекты поверхности и увеличение их концентрации, что приводит к образованию двойного электрического слоя/сильного электрического поля на границах этих дефектов; поэтому возникают новые фононные и электронные состояния). Третье – эффекты локального поля (размеры, форма, упорядоченность нанобъектов), влияющие на физико-химические характеристики наноматериалов и их уникальные свойства. Действие ряда этих эффектов на топологические, оптические и электрофизические свойства нанокластерных структур обсуждается в докладе.

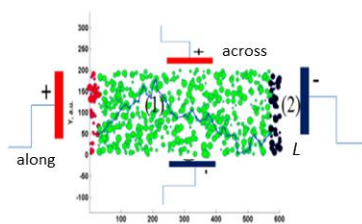


Рис. 1. Схема эксперимента

Методы лазерной модификации и синтеза наноматериалов позволяют наблюдать макроскопические квантовые явления в наноструктурированных/кластерных материалах (ср. [1]). Нами проведены эксперименты по наномодификации и осаждению металлических и полупроводниковых структур, демонстрирующие оптические и электрические свойства, существенно отличающиеся от исходных массивных образцов. Полученные принципиальные результаты в лазерном эксперименте приводятся на рис. 1-4. Дальнейшие исследования представляют особый интерес в связи с лазерным возбуждением в таких сильно неоднородных наноструктурах квазичастиц и использованием макроскопических квантовых состояний и эффектов корреляции (как в термодинамике фазовых переходов, так и в электропроводности) при комнатных температурах.

#### *Список литературы*

1. Аракелян С.М., Кучерик А.О., Прокошев В.Г., Рау В.Г., Сергеев А.Г. Введение в фемтонанопотонику: фундаментальные основы и лазерные методы управляемого получения и диагностики наноструктурированных материалов. М.: Логос, 2015.

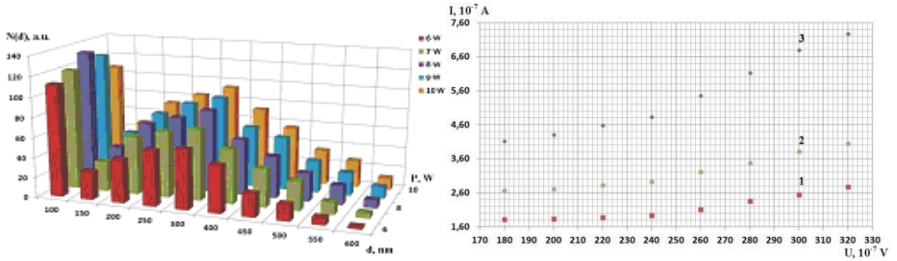


Рис. 2. Гистограмма бимодального распределения частиц/кластеров по размерам (d) на поверхности (Pb-Te)-образца при разных лазерных мощностях (P, W), справа – вольт-амперные характеристики для этих структур при различных средних размерах кластеров (d) и средних расстояний между кластерами (a), соответственно: (1) 120 нм и 20 нм; (2) 210 нм и 8 нм; (3) 120 нм и 8 нм ( туннельный эффект проводимости реализуется только для случая (3), когда d = 120 нм, a = 8 нм )

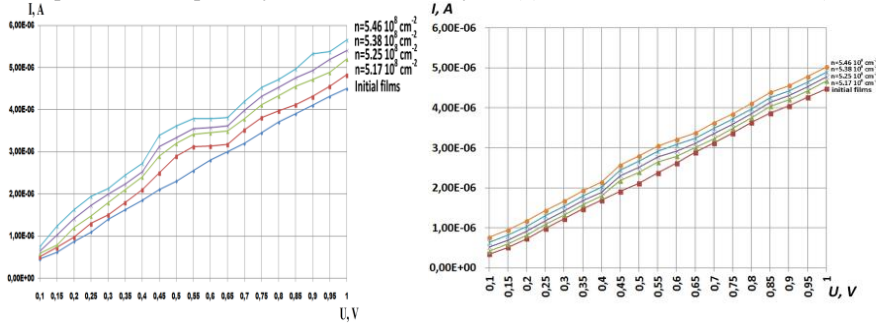


Рис. 3. Прыжковая электропроводимость для различных концентраций наночастиц/кластеров (вдоль – (3а) и поперек – (3б) длины образца Pb-Te) в рамках оболочечной модели кластеров видны переходы с разных оболочек

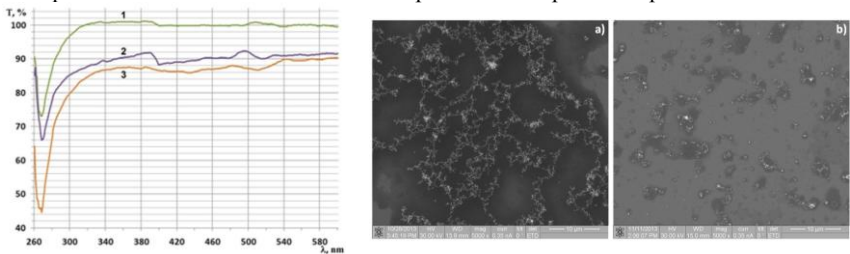


Рис. 4.Спектр пропускания для биметаллической (Au-Ag) кластерной структуры (при весовых соотношениях: 1 –1(Au):1(Ag); 2 –1:3; 3 –3:1) – видны области многоволновой интерференции в пленках, справа – РЭМ-изображения осажденных на кварцевой подложке кластеров Au-Ag с разной концентрацией 1:10 (а); 1:20 (b)



Я. АЛЬМОХАМЕД<sup>1</sup>, Р. БАРИЛЬ<sup>1</sup>, А.И. ВОДЧИЦ<sup>2</sup>,  
Ю.П. ВОЙНОВ, В.С. ГОРЕЛИК, А.Д. КУДРЯВЦЕВА,  
В.А. ОРЛОВИЧ<sup>2</sup>, Н.В. ЧЕРНЕГА

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

*<sup>1</sup>Университет Анжера, Франция*

*<sup>2</sup>Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск*

## **ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В ЖИДКОСТЯХ, ВВЕДЕННЫХ В ПОРЫ ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА**

Обнаружено значительное понижение порога и увеличение эффективности вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) в жидкостях, введённых в поры фотонных кристаллов, при определенных углах падения возбуждающего импульсного лазерного излучения на образцы.

Y. ALMOHAMED<sup>1</sup>, R. BARILLE<sup>1</sup>, A.I. VODCHITS<sup>2</sup>,  
Yu.P. VOINOV, V.S. GORELIK, A.D. KUDRYAVTSEVA,  
V.A. ORLOVICH<sup>2</sup>, N.V. TCHERNIEGA

*Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Universite of Angers, France*

*<sup>2</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics of the Belarus NAS, Minsk*

## **STIMULATED RAMAN SCATTERING IN LIQUIDS INSERTED INTO PORES OF PHOTONIC CRYSTAL**

Essential threshold decrease and efficiency increase of the stimulated Raman scattering (SRS) in liquids inserted into photonic crystal pores have been observed at definite angles of the exciting pulsed laser light incidence on the samples.

Одним из способов понижения порога вынужденного комбинационного рассеяния света (ВКР) является использование фотонных кристаллов (ФК). Характерным свойством трёхмерных ФК является существование в их спектре стоп-зон - областей запрещённых частот для заданных кристаллографических направлений. В работах [1,2] было показано, что вблизи края стоп-зоны фотонного кристалла аномально возрастает плотность фотонных состояний, что приводит к понижению порогов для наблюдения различных нелинейно-оптических процессов, включая ВКР.

Положение стоп-зоны в фотонных кристаллах можно изменять, меняя характеристики образцов [3], а также варьируя угол падения накачки на образцы. В данной работе ставилась задача установления закономерностей снижения порога ВКР в жидкостях, введённых в поры ФК, с обеспечением плавной перестройки спектрального положения стоп-зоны глобулярного фотонного кристалла путем варьирования углов падения возбуждающего излучения на поверхность (111) образца и отражения ВКР-излучения от этой поверхности. В качестве образцов нами использовались опаловые матрицы с диаметром глобул оксида кремния, близким к 270 нм, заполненные бензолом и сероуглеродом.

При фиксированном значении интенсивности накачки были зарегистрированы спектры зеркально отраженного от образца излучения для различных углов падения ( $10^\circ$ - $70^\circ$ ). При возрастании угла падения возбуждающего излучения на поверхность (111) образца спектральное положение стоп-зоны смещалось в сторону коротких длин волн. При определённых ("критических") углах падения ( $40^\circ$  для бензола и  $60^\circ$  для сероуглерода) наблюдалось резкое возрастание интенсивности ВКР; при этом в спектре возникало несколько стоксовых и одна антистоксова компонента. При удалении от критического угла интенсивность ВКР резко падала. Сопоставление спектров ВКР в бензоле и сероуглероде, полученных в условиях критического угла отражения, со спектрами отражения широкополосного излучения от поверхности (111) ФК показало, что эффективность ВКР резко возрастает, когда линии накачки и компонент ВКР находятся в области соответствующей стоп-зоны или вблизи её края. Порог ВКР в жидкости, заполняющей поры фотонного кристалла, на несколько порядков ниже, чем в сплошной среде.

Таким образом, в данной работе предложен эффективный способ спектрального анализа малых количеств комбинационно-активных сред на основе введения таких сред в поры ФК. Благодаря малой длительности импульсов возбуждающего лазерного излучения метод может применяться для спектральных исследований в реальном времени.

#### *Список литературы*

1. Bertolotti M. Wave interactions in photonic band structures: an overview // J.Opt.A: Pure Appl.Opt. 2006. V.8. No.4. P.S9.
2. Trofimov V.V., Fedotov M.V., Volkov A.G., Tcherniega N.V., Savranskii V.V., Lan S. Computer simulation and observation of anomalous light emission from nonlinear photonic crystal with various geometry of its elements // Laser Physics. 2010. V.20. P.1137.
3. Gorelik V.S., Kudryavtseva A.D., Tcherniega N.V., Vodchits A.I., Orlovich V.A. A method for reducing the stimulated Raman scattering threshold in liquids embedded into photonic crystals // Journal of Russian Laser Research. 2013. V.34. P.50-58.

Е.А. ЕКИМОВ, С.Г. ЛЯПИН, К.Н. БОЛДЫРЕВ<sup>1</sup>, В.А. ГАВВА<sup>2</sup>

*Институт физики высоких давлений РАН, Троицк*

<sup>1</sup>*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

<sup>2</sup>*Институт химии высокочистых веществ РАН, Нижний Новгород*

## **GeV: НОВЫЙ ЦЕНТР ОКРАСКИ В АЛМАЗЕ**

Настоящая работа посвящена синтезу при высоких давлениях и исследованию нано- и микрокристаллических алмазов, активированных новым германиевым центром окраски. На основе изотопического замещения германия, удалось показать, что интенсивная и узкая люминесценция в области 602 нм связана с образованием центров германий-вакансия (GeV). Обнаружена тонкая структура линий, появляющаяся при низких температурах (ниже 70 К), позволившая определить расщепления уровней основного и возбужденного состояний. Исследование изотопического смещения позволило идентифицировать линию 615 нм как локальную колебательную моду центра GeV. Данные исследования представляют интерес для различных областей науки и техники: медицины, биологии, квантовых вычислений, лазеров, люминофоров и др.

E.A. EKIMOV, S.G. LYAPIN, K.N. BOLDYREV<sup>1</sup>, V.A. GAVVA<sup>2</sup>

*Institute for High Pressure Physics of the RAS, Troitsk*

<sup>1</sup>*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

<sup>2</sup>*Institute of Chemistry of High-purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

## **GeV: NEW COLOR CENTER IN DIAMOND**

Present work is devoted to the high-pressure synthesis and investigation of nano- and microdiamonds activated by new Ge-related color center. Based on the isotopic substitution of germanium we showed that the intense and narrow luminescence at 602 nm is associated with the germanium-vacancy center (GeV). A fine structure of the line appearing at low temperatures (below 70 K) was found and the splitting of the ground and excited states were determined. A study of the isotope shift allowed identifying the line at 615 nm as a local vibrational mode of the GeV center. These studies are of interest to various areas of science and technology: medicine, biology, quantum computing, lasers, phosphors etc.

В течение последнего десятилетия, центры окраски в алмазе стали объектом очень пристального изучения в контексте их возможного использования в качестве люминесцентных маркеров в биологии, для измерения слабых магнитных полей с высоким пространственным разрешением и, самое главное, как трехуровневых  $\lambda$ -систем и эмиттеров одиночных фотонов для квантовой обработки информации и связи. В

частности, была показана возможность использования центров типа азот-вакансия (NV), кремний-вакансия (SiV), центров, связанных с Cr и Ni (NE8) как эмиттеров одиночных фотонов. Поиск и изучение новых люминесцентных центров окраски в алмазе имеет большое значение не только для расширения спектрального диапазона излучателей одиночных фотонов, но также для понимания взаимосвязи между структурой, схемой уровней энергии и люминесцентными свойствами центров окраски в алмазе.

Ранее, в работе [1] впервые проведены исследования алмазов, в которых были созданы центры германия методами ионной имплантации и CVD, и где была показана возможность использования этих центров как эмиттеров одиночных фотонов. Однако авторами не была доказана природа центра окраски. В настоящей работе мы создали такие центры другим методом, с применением технологии синтеза алмазов с применением высоких давлений и температур (HPHT). Были получены микро- и наноалмазы очень высокого качества, что позволило наблюдать линии, существенно более узкие, чем в работе [1]. Это также позволило обнаружить тонкую структуру линии при низких температурах, и определить расщепления основного и возбужденного состояний [2], что чрезвычайно важно для понимания природы центра и для применений в квантовых системах. Нами были проведены исследования с различным изотопическим замещением германия, а именно, с изотопами  $^{72}\text{Ge}$ ,  $^{73}\text{Ge}$  и  $^{76}\text{Ge}$ . По изотопическому смещению линий мы показали, что линия люминесценции 602 нм однозначно относится к центру GeV, а линия 615 нм относится к локальной колебательной моде этого центра [2]. Была проведена оценка концентрации центров GeV в алмазе, которая показала их очень высокую квантовую эффективность. Кроме того, было установлено, что ширина линии люминесценции не зависела от размера полученных кристаллов. Таким образом, еще одним важным применением центров GeV является возможность использования их как биомаркеров в медицине.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (Гранты № 15-02-05603 и 13-02-01091).

*Список литературы*

1. Iwasaki T., et al. // Scientific Report. 2015. No.5. P.12882.
2. Екимов Е.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т.102. Вып.11. С.811–816.

А.Ф. БУНКИН<sup>1</sup>, А.И. ЛОСКУТОВ<sup>2</sup>, В.Б. ОШУРКО<sup>1,2</sup>,  
С.М. ПЕРШИН<sup>1</sup>, А.Н. ФЕДОРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт общей физики РАН им. А.Н. Прохорова, Москва*

<sup>2</sup>*Московский государственный технологический университет "Станкин"*

## **ОБРАТНЫЙ TERS-ЭФФЕКТ В СЛОЯХ МЕТИЛГИДРОКСИЭТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Эффект снижения интенсивности рамановских СН полос обнаружен при приближении зонда сканирующего туннельного микроскопа к поверхности метилцеллюлозы. Механизмы явления обсуждаются.

A.F. BUNKIN<sup>1</sup>, A.I. LOSKUTOV<sup>2</sup>, V.B. OSHURKO<sup>1,2</sup>,  
S.M. PERSHIN<sup>1</sup>, A.N. FEDOROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Moscow State University of Technology «Stankin»*

## **INVERSED TIP ENHANCED RAMAN SCATTERING IN METHYLHYDROXYETHYLCELLULOSE LAYERS**

Phenomenon of decrease of raman scattering intensity (CH bands) when a tip of scanning tunneling microscope approaches methylcellulose surface is observed. Possible mechanisms are discussed.

Спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния (КР) на поверхности (surface enhanced Raman scattering, SERS), так же как и принципиально близкая к ней спектроскопия локального усиления комбинационного рассеяния (tip-enhanced Raman scattering, TERS) является исключительно перспективными методиками анализа единичных молекул, в частности для биомедицинских приложений. В отличие от обычного гигантского комбинационного рассеяния, в котором усиление сигнала на много порядков обусловлено присутствием проводящих неоднородностей субмикронного размера (частиц или шероховатостей), в методике TERS роль неоднородности, как известно, выполняет торец (кончик иглы) зонда сканирующего туннельного микроскопа. Реализация такого локального усиления комбинационного рассеяния света принципиально позволяет визуализировать последовательность нуклеотидов в единичной молекуле ДНК или аминокислот в белке.

Однако, на сегодняшний день общепризнано, что механизмы SERS (и TERS) ясны еще не до конца [1], что приводит к сложностям в

интерпретации и, нередко, плохой воспроизводимости результатов [1]. Все это позволяет еще раз поставить вопрос о механизме TERS эффекта.

В настоящей работе обнаружено снижение сигнала комбинационного рассеяния второй гармоники (532 нм) непрерывного Nd:YAG лазера в пленке (0.5 мкм) метилгидроксиэтилцеллюлозы на золотой подложке при подведении к поверхности платина-иридиевого зонда (радиусом ~10 нм) сканирующего туннельного микроскопа на расстояния 6 – 8 нм. На рис. 1 видны СН и ОН полосы целлюлозы, усиленные за счет TERS- эффекта. Как видно из рис. 1, при удалении больше или порядка ~ 10 нм усиление сигнала максимально, но при дальнейшем приближении сигнал уменьшается. При этом сигнал флюоресценции (справа и слева от ОН и СН полос), как видим, практически не изменялся.

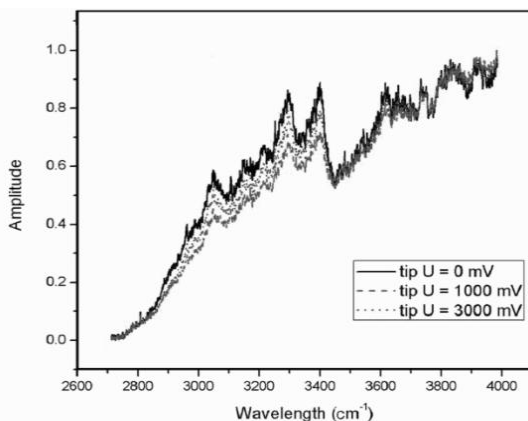


Рис. 1. Спектр в области СН колебательных полос метилцеллюлозы при различных удалениях зонда сканирующего туннельного микроскопа

Для объяснения причины указанных эффектов можно предположить, что основным действующим фактором является сильный градиент электрического поля зонда, существующего во всем объеме образца. Для выяснения механизмов требуются дальнейшие исследования.

Работа была частично поддержана грантами РФФИ 14-02-00018а и 14-02-00748а, программами РАН.

#### *Список литературы*

1. Schmid T., Opilik L., Blum C., Zenobi R. Nanoscale chemical imaging using tip-enhanced Raman spectroscopy: a critical review. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2013, 52, 2–17.

В.Д. АНЦЫГИН<sup>1</sup>, М.Ю. ВЛАСОВ<sup>1</sup>, А.А. МАМРАШЕВ<sup>1,2</sup>,  
Н.А. НИКОЛАЕВ<sup>1,2</sup>, О.И. ПОТАТУРКИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

<sup>2</sup>*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

## **ТЕРАГЕРЦОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНАТА СВИНЦА В ОБЛАСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА**

Исследованы терагерцовые диэлектрические свойства сегнетоэлектрических кристаллов германата свинца вдоль оптической полярной оси в спектральном диапазоне 0,1–1,1 ТГц при различных температурах вблизи точки фазового перехода 174 °С. Обнаружено смешение двух типов фазовых переходов: «смещение» и «порядок-беспорядок».

V.D. ANTASYGIN<sup>1</sup>, M.Yu. VLASOV<sup>1</sup>, A.A. MAMRASHEV<sup>1,2</sup>,  
N.A. NIKOLAEV<sup>1,2</sup>, O.I. POTATURKIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk*

<sup>2</sup>*Institute of High current Electronics SB RAS, Tomsk*

## **TERAHERTZ PROPERTIES OF LEAD GERMANATE NEAR PHASE TRANSITION**

We studied terahertz dielectric properties of ferroelectric crystals of lead germanate along optical polar axis in a spectral range of 0.1–1.1 THz near the temperature of phase transition at 174 °C. We observed a mixture of “order-disorder” and “displacement” types of phase transitions.

Исследована температурная зависимость терагерцовых диэлектрических свойств сегнетоэлектрических кристаллов германата свинца вдоль оптической полярной оси в диапазоне от комнатной температуры до 200 °С. По измерениям пропускания кристаллов толщиной ~270 мкм в спектральном диапазоне 0,1–1,1 ТГц рассчитана их комплексная диэлектрическая проницаемость. Спектры мнимой части диэлектрической проницаемости аппроксимированы набором лоренцовских осцилляторов: на нулевой частоте, на фиксированной частоте 2,7 ТГц и частоте изменяющейся от 0,8 до 0,3 ТГц при нагревании до температуры фазового перехода 174 °С (рис. 1).

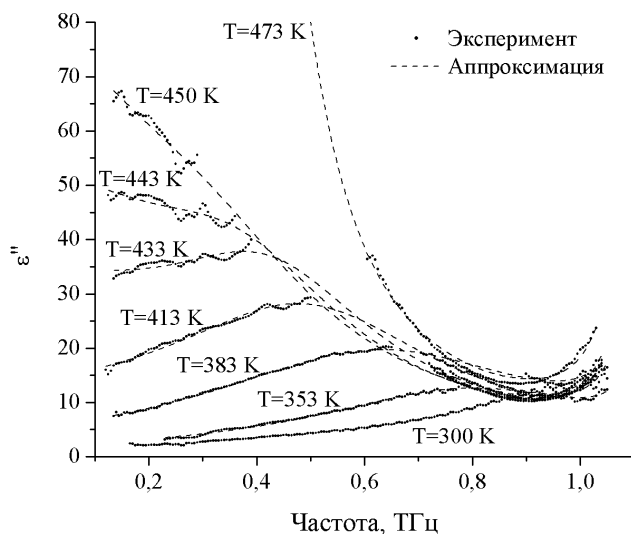


Рис. 1. Мнимая часть диэлектрической проницаемости германата свинца при различных температурах

Линия поглощения на нулевой частоте и фоновая мода, частота которой меняется при изменении температуры, отражают две особенности кристаллической структуры материала: центральный пик и мягкую моду. Центральный пик является признаком фазового перехода типа «порядок-беспорядок» в сегнетоэлектриках, а мягкая мода характеризует фазовый переход типа «смещения» [1]. Результаты исследования терагерцовых свойств при нагревании до температуры 174 °С показывают, что наблюдается смешение переходов двух типов [2].

*Список литературы*

1. Bruce A.D and Cowley R.A. Structural Phase Transitions. Taylor & Francis, 1981.
2. Surovtsev N.V., Pugachev A.M., Malinovsky V.K., Shebanin A.P., Kojima S. Low-frequency Raman spectra in LiNbO<sub>3</sub>: Within and beyond the standard paradigm of ferroelectric dynamics // Phys. Rev. B. 2005. V.72. No.10. P.104303.



И.А. КАПЛУНОВ, П.А. НИКИТИН<sup>1</sup>, В.Б. ВОЛОШИНОВ<sup>1</sup>

*Тверской государственной университет*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПРОПУСКАНИЯ ГЕРМАНИЯ В ИНФРАКРАСНОМ И ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

Исследовано пропускание легированных монокристаллов германия в инфракрасном диапазоне (2,5-25,0 мкм) и терагерцовом диапазоне (130 мкм) длин волн. Показано влияние на оптическое пропускание вида и концентрации легирующей примеси.

I.A. KAPLUNOV, P.A. NIKININ<sup>1</sup>, V.B. VOLOSHINOV<sup>1</sup>

*Tver State University*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **MEASUREMENT OF GERMANIUM TRANSMISSION INFRARED AND TERAHERTZ WAVELENGTH RANGE**

Transmission of doped germanium single crystals was studied in the infrared (2.5-25.0 micrometers) and terahertz (130 micrometers) wavelength ranges. The effect of type and concentration of doping impurities on the optical transmission is shown.

Терагерцовое (ТГц) излучение находит применение в новых и традиционных приложениях, связанных с исследованием, анализом и контролем материалов и объектов, формированием изображений и др. Для терагерцовой техники используют кремний, кристаллический кварц, сапфир, ряд полимеров. Применение германия как оптического материала и материала акустооптических устройств требует уточнения характеристик в терагерцовом диапазоне длин волн. Эксперименты проводились при использовании Новосибирского лазера на свободных электронах на длине излучения 130 мкм и в спектральном диапазоне 2,5-25 мкм с помощью ИК спектрометра. Исследования выполнены на образцах германия, выращенных из расплава методом Чохральского в кристаллографическом направлении  $\langle 111 \rangle$ . Исследовали монокристаллы, легированные сурьмой и совместно сурьмой-галлием (компенсированные кристаллы). Подготовка поверхности включала полировку ( $N < 1$ ;  $\Delta N < 0,5$ ) и шлифовку (шлифовка абразив М10) образцов монокристаллов.

В табл. 1 и на рис. 1 представлены результаты эксперимента. Номера кривых на спектральных зависимостях в инфракрасном диапазоне

соответствуют номерам образцов в таблице 1. Результаты эксперимента показывают резкую зависимость пропускания излучения терагерцового диапазона от концентрации примеси. Оптические исследования аналогичных образцов в инфракрасном диапазоне характеризуются иными результатами, связанными с преимущественным поглощением в ИК диапазоне на свободных носителях заряда.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», Соглашение 14.577.21.0004 (RFMEFI57714X0004).

Таблица 1. Пропускание германия в исследуемых спектральных диапазонах

Оптические параметры и характеристика образцов	Номер образца (толщина образцов 1,0 см)				
	1	2	3	4	5
Пропускание, $\lambda = 130$ мкм ( $n = 4$ )	$1,3841 \cdot 10^{-5}$	$5,5882 \cdot 10^{-5}$	0,1469	0,050	0,1375
Кэф.ослабления $\alpha$ , $\text{см}^{-1}$ , 130 мкм	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	1,043	2,113	1,107
Пропускание $\lambda = 10,6$ мкм; ( $n = 4,0048$ )	0,135	0,364	0,465	0,462	0,428
Кэф.ослабления $\alpha$ , $\text{см}^{-1}$ , 10,6 мкм	1,159	0,184	0,024	0,041	0,032
Концентрация примеси, $\text{см}^{-3}$ /примесь	$8,0 \cdot 10^{15}$ /Sb	$8,0 \cdot 10^{15}$ /Sb	$1,3 \cdot 10^{14}$ /Sb	$3,0 \cdot 10^{14}$ /Sb	$5,5 \cdot 10^{13}$ * /Sb-Ga
Удельное сопротивление, Ом·см	0,26	0,26	13,5	5,0	33,0
Тип электропроводности	$n$	$n$	$n$	$n$	$p$
Обработка поверхности	Шлифовка	Полировка	Полировка	Полировка	Полировка
Плотность дислокаций, $\text{см}^{-2}$	$< 10$	$< 10$	$10^4$	$10^4$	$10^4$

\* - разностная концентрация примеси (сурьмы  $7,0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; галлия  $1,25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ).

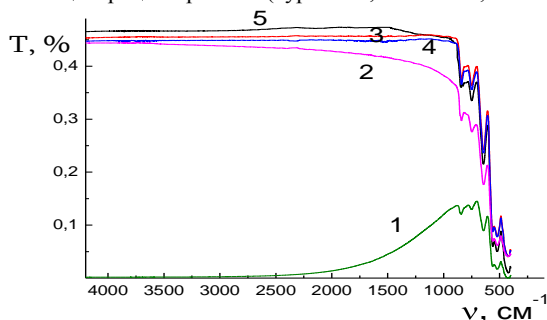


Рис. 1. Оптическое пропускание германия в инфракрасном диапазоне

С.М. ШАНДАРОВ, А.Е. МАНДЕЛЬ, С.В. СМИРНОВ,  
Т.М. АКЫЛБАЕВ, М.В. БОРОДИН,  
А.Р. АХМАТХАНОВ<sup>1</sup>, В.Я. ШУР<sup>1</sup>

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
<sup>1</sup>Уральский государственный университет, Екатеринбург*

## **КОЛЛИНЕАРНАЯ ДИФРАКЦИЯ НЕКОГЕРЕНТНОГО СВЕТА НА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЕ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований дифракции света на сформированной в легированном магнием кристалле ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3:5\% \text{MgO}$ ) периодической доменной структуре с пространственным периодом  $\Lambda = 6.89$  мкм. Наблюдалась коллинеарная дифракция некогерентного света со спектральной полушириной  $\Delta\lambda_r \approx 4$  нм при центральной длине волны  $\lambda_{r0} \approx 623$  нм из красной области спектра и с  $\Delta\lambda_v \approx 3$  нм при  $\lambda_{v0} \approx 397.5$  нм из фиолетовой области спектра.

S.M. SHANDAROV, A.E. MANDEL, S.V. SMIRNOV,  
T.M. AKYLBAEV, M.V. BORODIN,  
A.R. AKHMATKHANOV<sup>1</sup>, V.Ya. SHUR<sup>1</sup>

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
<sup>1</sup>Ural State University, Ekaterinburg*

## **COLLINEAR DIFFRACTION OF INCOHERENT LIGHT ON PERIODICALLY POLED DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM NIOBATE**

We report on experimental investigation of light diffraction on the PPLN with spatial period of 6.89  $\mu\text{m}$ . Collinear diffraction of incoherent light with spectral halfwidths  $\Delta\lambda_r \approx 4$  nm at the central wavelength  $\lambda_{r0} \approx 623$  nm from the red region of the spectrum and  $\Delta\lambda_v \approx 3$  nm at  $\lambda_{v0} \approx 397.5$  nm from the violet region of the spectrum was observed.

Одним из неразрушающих и информативных методов определения качества периодических доменных структур (ПДС) в электрооптических кристаллах является дифракция света на такой доменной структуре [1, 2].

В настоящем сообщении представлены результаты экспериментального исследования коллинеарной дифракции некогерентного света на ПДС в монокристаллическом образце

легированного оксидом магния ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ; 5%  $\text{MgO}$ ). Периодическая доменная структура с пространственным периодом  $\Lambda = 6.89$  мкм была изготовлена в ООО ЛАБФЕР методом реполяризации во внешнем пространственно-периодическом электрическом поле.

Для точного определения спектральных характеристик коллинеарной дифракции на ПДС в исследуемом образце использовалась экспериментальная установка на основе монохроматора. В качестве источника света использовалась галогенная лампа, излучающая в спектральной области от 350 до 2000 нм. Кристалл с ПДС помещался между скрещенными поляризационными призмами. Наблюдаемые вблизи центральных длин волн 623 и 397.5 нм спектральные зависимости относительной интенсивности дифрагированного излучения показаны на рис. 1.

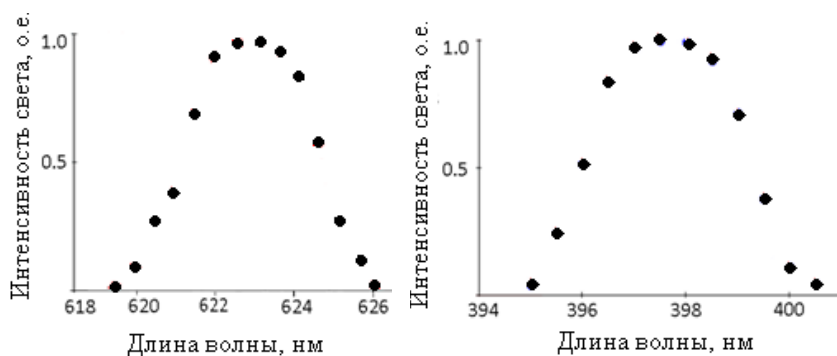


Рис. 1. Спектральное распределение интенсивности дифрагированного света при коллинеарной дифракции в кристалле  $\text{LiNbO}_3$ ; 5%  $\text{MgO}$  с ПДС

Проведенные экспериментальные исследования позволили зафиксировать коллинеарную дифракцию со спектральной полушириной  $\Delta\lambda_r \approx 4$  нм при центральной длине волны  $\lambda_{r0} \approx 623$  нм из красной области спектра и с  $\Delta\lambda_r \approx 3$  нм при  $\lambda_{r0} \approx 397.5$  нм из фиолетовой области спектра.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ на 2015 год и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

#### Список литературы

1. Александровский А.Л., Глико О.А., Наумова И.И., Прялкин В.И. Линейная и нелинейная дифракционные решетки в монокристаллах ниобата лития с периодической доменной структурой // Квантовая электроника. 1996. Т.23. №7. С.657–659.

2. Müller M., Soergel E., Buse K., Langrock C., Fejer M.M. Investigation of periodically poled lithium niobate crystals by light diffraction // J. Appl. Phys. 2005. V.97. Is.4. P.044102.

Н.А. ТЕПЛЯКОВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ,  
Д.В. МАНУКОВСКАЯ

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты*

## **ЭВОЛЮЦИЯ ВО ВРЕМЕНИ СОБСТВЕННЫХ И ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Методами спектроскопии КРС, фотоиндуцированного рассеяния света и лазерной коноскопии исследована серия кристаллов ниобата лития с низким эффектом фоторефракции с целью экспериментального обнаружения и выяснения роли различного рода дефектов и особенностей вторичной структуры в кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  разного состава в формировании их фоторефрактивных свойств, структурной и оптической однородности.

N.A. TEPLYAKOVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV,  
D.V. MANUKOVSKAYA

*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **THE TIME EVOLUTION OF INTRINSIC AND LASER INDUCED DEFECTS IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS EXPOSED TO LASER RADIATION**

By Raman spectroscopy, photo-induced light scattering and laser conoscopy a series of lithium niobate crystals with low photorefractive effect were studied to determine the role of different types of defects and of the secondary structure features in  $\text{LiNbO}_3$  crystals of different composition in forming of their photorefractive properties, structural and optical homogeneity.

В данной работе методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) и лазерной коноскопии исследованы кристаллы ниобата лития: номинально чистые и легированные. Установлено, что исследованные кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  делятся на три группы по величине эффекта фоторефракции, по виду индикатрисы спекл-картины ФИРС и быстроте ее раскрытия со временем. Для кристаллов первой группы:  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}(0.51)$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(0.078)$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0.0036):\text{Mg}(0.86)$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}(0.2):\text{Mg}(0.75)$ ,  $\text{LiNbO}_3:\text{Ta}(1.13)$ :

Mg(0.011), LiNbO<sub>3</sub>:Zn(0.03 вес.%) индикатриса ФИРС не раскрывается даже при мощности возбуждающего излучения 160 мВт. В то же время для кристаллов второй группы: LiNbO<sub>3</sub>стех., LiNbO<sub>3</sub>:B(0.12), LiNbO<sub>3</sub>:Cu(0.015), LiNbO<sub>3</sub>:Zn(0.52, 0.62 вес.%) индикатриса рассеяния раскрывается в течение ~60 секунд с момента облучения кристалла лазерным излучением, а для кристаллов третьей группы: LiNbO<sub>3</sub>:Y(0.46) и LiNbO<sub>3</sub>:Y(0.24):Mg(0.63 вес.%) – на порядок быстрее, в первые секунды с момента облучения, что потенциально ставит эти кристаллы в ряд перспективных материалов для голографии, электрооптических модуляторов и затворов. Установлено, что асимметрия спекл-структуры индикатрисы ФИРС в кристаллах LiNbO<sub>3</sub> обусловлена двулучепреломлением возбуждающего лазерного излучения. Показано, что особенности распространения и взаимодействие обыкновенного и необыкновенного лучей в фоторефрактивном кристалле LiNbO<sub>3</sub> приводят к обмену энергий между ними таким образом, что со временем изначально менее интенсивный необыкновенный луч приобретает большую интенсивность по сравнению с обыкновенным. Вид картины ФИРС зависит от разности значений показателей преломления  $\Delta n = n_o - n_e$  и соотношения энергий  $E$  обыкновенного ( $n_o$ ) и необыкновенного ( $n_e$ ) лучей. Показано, что асимметрия индикатрисы ФИРС, величина двулучепреломления и интенсивность обыкновенного и необыкновенного лучей зависят от вида и концентрации легирующих примесей. В тоже время асимметрия спектров КРС в фоторефрактивном кристалле LiNbO<sub>3</sub> обусловлена как наличием спонтанной поляризации (вклад в которую вносит не только смещение ионов Nb<sup>5+</sup> от центра кислородных октаэдров O<sub>6</sub>, но и особенности порядка расположения катионов вдоль полярной оси), так и двулучепреломлением. При этом порядок чередования основных и примесных катионов в положительном и отрицательном направлении полярной оси в кристалле LiNbO<sub>3</sub> различен, что определяет особенности и отличия спектра КРС в «эквивалентных» геометриях рассеяния. Посредством анализа фрактальной размерности исследована динамика проявления лазерно-индуцированных дефектов в различных слоях картин ФИРС в кристаллах LiNbO<sub>3</sub>. Обнаружена перекачка энергии между слоями ФИРС. Показано, что, в отличие от метода исследования ФИРС по измерению во времени угла раскрытия индикатрисы рассеяния, исследование динамики во времени фрактальной размерности различных слоев картины ФИРС позволяет регистрировать особенности изменения во времени упорядоченности лазерно-индуцированных дефектов в кристалле.

Н.Н. НАЛБАНТОВ, Е.В. СТРОГАНОВА, В.В. ГАЛУЦКИЙ  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ГРАДИЕНТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛАХ Er:Yb:LiNbO<sub>3</sub>**

Проведено моделирование распределения квантовой эффективности переноса энергии в лазерных кристаллах ниобата лития с неравномерным распределением оптических центров (концентрационными профилями) Er<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> для процесса получения генерации в области 1,5 мкм.

N.N. NALBANTOV, E.V. STROGANOVA, V.V. GALUTSKIY  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **QUANTUM EFFICIENCY OF ENERGY TRANSFER IN Er:Yb:LiNbO<sub>3</sub> GRADIENT LASER CRYSTALS**

Distribution of values of quantum efficiency of energy transfer in lithium niobate crystals with non-uniform profiles of concentration of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> ions was evaluated for the case of 1,5μ laser generation.

Распределение квантовой эффективности переноса энергии от донорных ионов-сенситизаторов к активным ионам-акцепторам является важнейшим регулируемым параметром в градиентных лазерных кристаллах с двойным легированием. Методика получения таких кристаллов разработана в КубГУ [1], а проведенные ранее теоретические исследования показали их высокие генерационные свойства [2, 3].

В качестве базового элемента для моделирования был выбран кристалл Er:Yb:LiNbO<sub>3</sub> в микроциповом исполнении с габаритами L=0,5x0,5x0,5 см, помещенный в резонатор Фабри-Перо с коэффициентом полезных потерь T=0,02. Накачка системы производилась на длине волны λ<sub>нак</sub>=980 нм. Общая формула, характеризующая процесс переноса энергии между ионами Yb<sup>3+</sup>-Er<sup>3+</sup> для системы энергетических уровней в данной кристаллической матрице, была преобразована к виду (1), где: A<sub>RE</sub> – постоянная времени распада энергетического состояния, с; C<sub>RE-RE</sub> – коэффициент эффективности безызлучательных переносов, см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>; σ<sub>RE</sub> – сечение поглощения, см<sup>2</sup>; N<sub>RE</sub> – концентрация ионов, см<sup>-3</sup>.

$$\eta = \frac{\frac{A_{Er}}{A_{Er} + C_{Er-Yb}N_{Yb}}}{\sigma_{Yb}N_{Yb} + \sigma_{Er,пор.л}N_{Er}} \cdot \left( \frac{C_{Yb-Er}N_{Er}\sigma_{Yb}N_{Yb}}{C_{Yb-Er}N_{Er}A_S + A_{Yb}} + \sigma_{Er}N_{Er} \right), \quad (1)$$

Для разных комбинаций градиентов (концентрационных профилей оптических центров) были получены различные продольные профили распределения значений квантовой эффективности  $\eta(z)$  (рис. 1а, б). Ключевым фактором, определяющим значение данного параметра, является соотношение концентраций оптических примесей  $N_{Yb}/N_{Er}$ , с ростом которого наблюдается монотонное падение значения  $\eta$ .

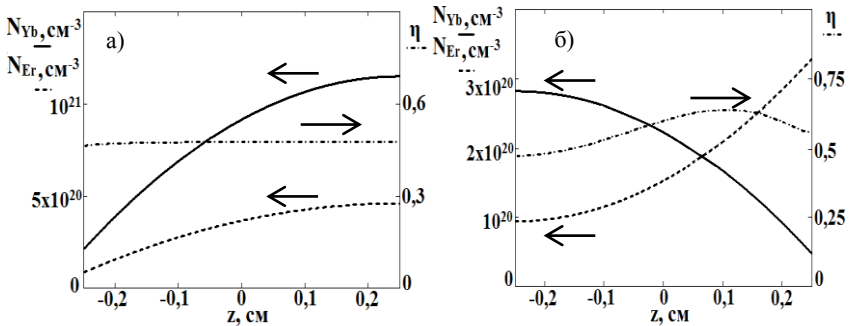


Рис. 1. Градиенты концентрации ионов  $Yb^{3+}$  (сплошная линия),  $Er^{3+}$  (пунктир); зависимость квантовой эффективности от продольной координаты (штрих-пунктир)

#### Список литературы

- Galutskiy V.V., Vatlina M.I., Stroganova E.V. Growth of single crystal with a gradient of concentration of impurities by the Czochralski method using additional liquid charging // Journal of Crystal Growth. 2009. V.311. P.1190–1194.
- Налбантов Н.Н., Строганова Е.В., Галуцкий В.В. Распределение электромагнитного поля продольной накачки в градиентном лазерном кристалле // Сборник трудов VIII международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2013». Санкт-Петербург, 2013. С.168–171.
- Строганова Е.В., Галуцкий В.В., Ткачев Д.С. и др. Увеличение эффективности накачки при использовании градиентно сенсibilизированных лазерных кристаллов // Оптика и спектроскопия. 2014. Т.117. №6. С.1012–1017.



В.Г. ДЮ, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ВЛИЯНИЕ ЗАСВЕТКИ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$**

Представлены результаты экспериментальных исследований изменений оптического поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ , наведенных непрерывным лазерным излучением с длинами волн 532, 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871 и 1064 нм.

V.G. DYU, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **INFLUENCE OF AN EXPOSURE BY CONTINUOUS LASER RADIATION ON OPTICAL ABSORPTION CHANGES IN $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ CRYSTAL**

The results of experimental studies of changes in optical absorption in  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  crystal, which induced by continuous laser radiation with wavelengths of 532, 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871 and 1064 nm are presented.

Воздействие на кристаллы класса силленитов светом из видимой и ближней УФ области приводит к фотохромному эффекту, который заключается в обратимом изменении их оптического поглощения [1].

В работе проведены экспериментальные исследования спектральных зависимостей оптического поглощения в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ , подвергнутого облучению непрерывным лазерным излучением, вначале с длиной волны  $\lambda_i = 532$  нм, а затем с  $\lambda_n = 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871$  и 1064 нм. В экспериментах исследовался образец  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$ , выращенный TSSG-методом, имеющий толщину 6,6 мм вдоль кристаллографического направления [100]. Спектры пропускания кристалла регистрировались как до, так и после каждой засветки непрерывным лазерным излучением на спектрофотометре СФ-56 в диапазоне 470-1000 нм. Облучение кристалла осуществлялось до насыщения в спектрах поглощения.

Получено, что хотя в исходном состоянии спектр оптического поглощения  $k(\lambda)$  кристалла  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Al}$  изменялся от эксперимента к эксперименту, экспозиция светом с  $\lambda_i = 532$  нм ( $I_i = 15,4$  мВт/см<sup>2</sup>) используемая на первом этапе, каждый раз приводила его к неизменной

форме, с максимальными наблюдаемыми значениями  $k(\lambda)$ . Последующая засветка лазерным излучением с  $\lambda_{bleach} = 588, 633, 655, 663, 700, 780, 871$  и  $1064$  нм приводит к просветлению кристалла во всем исследованном диапазоне. Наибольшее уменьшение оптического поглощения кристалла наблюдалось при засветке его излучением с длиной волны  $663$  нм.

Наблюдаемые особенности эффекта фотоиндуцированного изменения поглощения в кристалле  $Vi_{12}TiO_{20}:Al$  при его последовательной засветке могут быть объяснены с использованием диаграммы конфигурационных координат для процесса перехода между двумя состояниями дефектного центра с различными сечениями поглощения фотона  $S$ , которая приведена на рис. 1. Параболы  $E_{d1}(Q)$  и  $E_{d2}(Q)$  соответствуют состояниям дефектного центра – основному, с малым значением  $S_0$ , и возбужденному метастабильному, с  $S_{ex} > S_0$ . При энергии кванта излучения с  $\lambda_i = 532$  нм, соответствующей вертикальному переходу из состояния А с максимальной концентрацией центров в основном состоянии, они эффективно переводятся в возбужденное состояние (переход АВ), что приводит к затемнению кристалла.

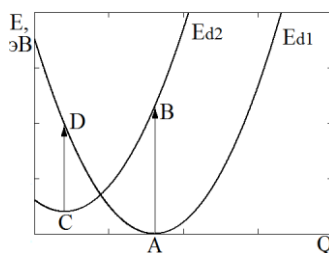


Рис. 1. Диаграмма конфигурационных координат дефектного центра

Просветление кристалла будет максимальным для излучения с энергией кванта, соответствующей вертикальному переходу CD. В рассмотренном случае кристалла  $Vi_{12}TiO_{20}:Al$  длину волны излучения, обеспечивающую вертикальный переход CD, можно оценить как  $\lambda_{bleachopt} \approx 670$  нм.

Наблюдаемые спектральные зависимости оптического поглощения удовлетворительно аппроксимировались в рамках модели примесного поглощения, учитывающей вклад фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров с нормальным законом распределения концентраций по энергии ионизации и внутрицентровых переходов [2], дополненной описанной выше моделью дефектного центра.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ на 2015 год и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

#### Список литературы

1. Малиновский В.К., Гудаев О.А., Гусев В.А., Деменко С.И. Фотоиндуцированные явления в силленитах. Новосибирск: Наука, 1990.
2. Кистенева М.Г., Худякова Е.С., Шандаров С.М., Акрестина А.С., Дю В.Г., Каргин Ю.Ф. Спектральные зависимости примесного оптического поглощения в кристаллах силленитов // Квантовая электроника. 2015. Т.45. №7. С.685–690.

А.Л. АНДРЕЕВ<sup>2</sup>, И.Н. КОМПАНЕЦ<sup>1,2</sup>, Н.В. ЗАЛЯПИН<sup>1</sup>,  
Р.С. СТАРИКОВ<sup>1</sup>

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

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

## **УПРАВЛЯЕМОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ БИСТАБИЛЬНОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В НЕГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ**

Показано, что процесс рассеяния света на динамической доменной структуре, возникающей при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии в негеликоидальных СЖК, имеет при определенных условиях бистабильный характер, и любое из двух оптических состояний может быть включено за десятки микросекунд и сохраняться в течение нескольких десятков секунд.

A.L. ANDREEV<sup>2</sup>, I.N. KOMPANETS<sup>1,2</sup>, N.V. ZALYAPIN<sup>1</sup>,  
R.S. STARIKOV<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

## **ELECTRICALLY CONTROLLED BISTABLE LIGHT SCATTERING IN HELIX-FREE FLC**

It was shown the process of light scattering on dynamic domain structure arising at the transition to Maxwellian mechanism of energy dissipation in helix-free FLC has the bistable character at definite conditions, and any of two optical states can be switched on for a few dozens of microseconds and can be kept for a few dozens of seconds.

Рассматривается рассеяние света в ячейке негеликоидального СЖК при переходе к максвелловскому механизму диссипации энергии и возникновении волн стационарного профиля – солитонов [1].

Возникновение солитонов приводит к образованию структуры переходных доменов – спонтанно упорядоченных областей, на границах которых происходит рассеяние света. Но движение солитонов ориентирует директор во всем объеме СЖК, и если плоскость поляризации падающего света лежит вдоль направления директора (вдоль главной оптической оси СЖК), то светопропускание электрооптической ячейки становится максимально возможным. Инверсия знака электрического поля (поляриности импульсов управляющего напряжения)

вновь индуцирует образование солитонных волн, появление градиентов показателя преломления вдоль смектических слоев и рассеяние света.

При определенном соотношении между амплитудой и длительностью биполярных импульсов управляющего напряжения, энергией деформации смектических слоев и спонтанной поляризацией СЖК, периодом деформации слоев и толщиной электрооптической ячейки процесс рассеяния имеет бистабильный характер (рис. 1).

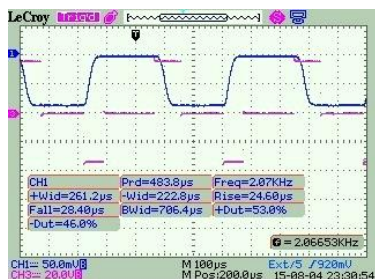


Рис. 1. Осциллограммы биполярного управляющего напряжения ( $\pm 35$  В, в середине – 0 В) и оптического отклика (верхний уровень - рассеивающее состояние, нижний - пропускающее) при бистабильном режиме переключения, толщина СЖК-ячейки 13 мкм, частота модуляции света 2 кГц

Переключение импульсами напряжения разной длительности обеспечивает работу электрооптической ячейки в бистабильном режиме со светопропусканием порядка 80% и контрастным отношением свыше 200:1. Время переключения для данной ячейки было менее 30 мкс. Оба оптических состояния (как с максимальным светопропусканием, так и с максимальной эффективностью светорассеяния) могли сохраняться в течение нескольких десятков секунд после выключения электрического поля или до прихода импульса обратной полярности. Изменение скважности между импульсами управляющего напряжения (при сохранении длительности) приводит к изменению соотношения между временем существования обоих оптических состояний. Сильная зависимость эффективности светорассеяния от амплитуды, частоты следования и длительности импульсов управляющего напряжения позволяла управлять процессом рассеяния (изменять светопропускание электрооптической ячейки), меняя как длительность, так и амплитуду импульсов напряжения.

#### Список литературы

1. Andreev A.L., et. al. // Journal of the SID. 2014. V.22. Is.2. P.115-121.

С.А. АЛИЕВ, Н.С. ТРОФИМОВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

*Российский университет дружбы народов, Москва*

## **ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕЛЬ-ПЛЕНОК ДИОКСИДА ТИТАНА С НАНОЧАСТИЦАМИ ЗОЛОТА**

В работе исследуются спектры пропускания пленок диоксида титана, содержащих наночастицы золота, изготовленных по гель-технологии. В зависимости от соотношения компонент раствора для изготовления гель-пленок и содержания золота в них, а также температуры отжига при формировании пленок наблюдались существенные изменения спектров, а именно, возникали дополнительные пики поглощения разной интенсивности и сдвиг края зоны пропускания. Эти изменения обусловлены, по-видимому, изменением структуры пленок, а также агрегацией наночастиц золота.

S.A. ALIEV, N.S. TROFIMOV, T.K. CHEKHLOVA

*Peoples' Friendship University of Russia*

## **OPTICAL PROPERTIES OF TITAN DIOXIDE GEL FILMS WITH THE GOLD NANOPARTICLES**

We study the transmission spectra of the films of titanium dioxide containing gold nanoparticles fabricated by gel technology. Depending on the ratio of components of the solution for the production of gel films and the content of gold in them, as well as the annealing temperature during the formation of the films, significant changes in the spectra were observed, namely, there were additional absorption peaks of varying intensity and the shift of the passband edge. These changes are caused apparently by changing the film structure, and the aggregation of gold nanoparticles.

Композитные диэлектрические пленки с наночастицами металлов в последнее время привлекают внимание исследователей благодаря своим необычным свойствам, отличающимся от свойств объемных материалов. Введение таких частиц в композитную пленку приводит к появлению качественно новых физических свойств [1, 2]. Например, происходит возникновение полос поглощения в видимой области спектра, обусловленное резонансными явлениями на плазмонах. Такие диэлектрические матрицы с металлическими наночастицами могут быть использованы для повышения чувствительности спектральных методов анализа состава веществ, для создания новых метаматериалов, синтеза сверхрешеток, включая фотонные кристаллы. Особый интерес

представляют оптические и нелинейно-оптические свойства таких структур.

В настоящей работе проведено исследование спектральных характеристик пленок диоксида титана с наночастицами золота. Исследования проводились на пленках, сформированных с помощью нового гель-метода при разных параметрах технологического режима, а именно, состава исходных растворов и температуры отжига. Кроме того, варьировалась и концентрация золота в образцах.

Исследование спектров пропускания полученных образцов было проведено с помощью спектрофотометра SPECORD.

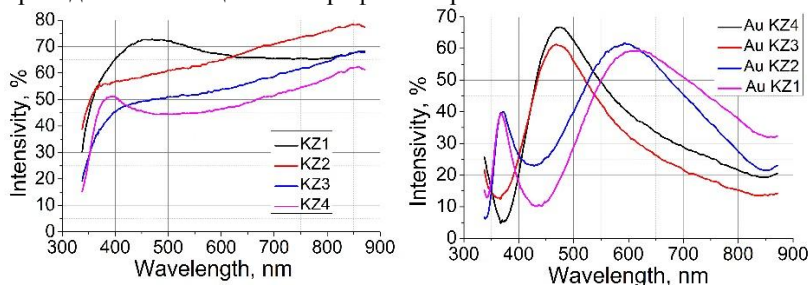


Рис. 1. Спектр пропускания образцов с золотом (а) и разностные спектры поглощения Au в пленках (б)

Анализ полученных спектров позволяет сделать выводы об изменении спектров пропускания при введении в пленки наночастиц золота (рис. 1а). Изменялась интенсивность полос поглощения и их спектральное положение. Наглядное представление об изменении спектров дает рис. 1б, который представляет собой разностный спектр, полученный вычитанием спектров образцов без золота и с золотом.

При введении золота происходит увеличение поглощения во всем спектральном диапазоне. Как видно из рис. 1б при температуре отжига 450 °С наблюдался характерный пик на длине волны 600 нм. Увеличение температуры отжига изменяет спектральное положение пика, сдвигая его в коротковолновую область на 130 нм. Сдвиг пика и изменение его ширины, по-видимому, связано с образованием агломератов, изменением размера и формы частиц.

#### Список литературы

1. Kreibig U., Vollmer M. Optical Properties of Metal Clusters. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
2. Карпов С.В., Слабко В.В. Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2003.

К.В. ШИШКИНА<sup>1,2</sup>, В.И. ЛУКАНИН<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ОСОБЕННОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ДВУХФОТОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ВОЛЬФРАМАТОВ И МОЛИБДАТОВ**

В работе исследовался нелинейный процесс двухфотонного поглощения в оксидных кристаллах вольфраматов и молибдатов при их возбуждении пикосекундными лазерными импульсами на длине волны возбуждения 523.5 нм. Была предложена экспериментальная методика и поставлен ряд экспериментов по исследованию поглощения пикосекундных импульсов в рассматриваемых кристаллах. Были определены коэффициенты двухфотонного поглощения.

K. V. SHISHKINA<sup>1,2</sup>, V. I. LUKANIN<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **NONLINEAR TWO-PHOTON ABSORPTION IN TUNGSTATES AND MOLYBDATE CRYSTALS**

In this paper we investigate the nonlinear process of two-photon absorption in tungstate and molybdate crystals, under picosecond laser excitation at a wavelength of 523.5 nm. Proposed experimental method and set out a number of experiments to study absorption of picosecond pulses in the considered crystals. The coefficients of two-photon absorption were determined.

Данная работа посвящена исследованию нелинейного двухфотонного поглощения в кристаллах вольфраматов и молибдатов, которые активно используются в качестве детекторов ионизирующих излучений [1, 2], а также в нелинейной оптике [3, 4].

Исследуя данные кристаллы с точки зрения эффективных ВКР-преобразователей в УФ области спектра, было обнаружено нелинейное явление, также как и процесс ВКР, связанное с кубической нелинейностью – двухфотонное поглощение (ДФП). Так при возбуждении кристаллов второй гармоникой лазера  $\text{YLiF:Nd}^{3+}$  наблюдалось сильное нелинейное поглощение, что приводило к полному подавлению генерации ВКР на длине волны возбуждения. В то же время каскадное ВКР с последовательной генерацией нескольких стоксовых компонент легко

наблюдается при накачке кристалла на основной длине волны лазера. Еще большее нелинейное поглощение наблюдалось в исследуемых кристаллах при накачке образцов третьей гармоникой лазера, что связано с увеличением плотности конечных состояний, процесс ДФП становится резонансно усиленным, а в предельном случае может наблюдаться и двухступенчатое поглощение. Поэтому становится особенно актуальным исследование и влияние ДФП на эффективность ВКР в видимой и ближней УФ области.

Для повышения точности измерения и обработки сигнала пропускание исследуемых образцов измерялось за одну лазерную вспышку, с учетом профиля пучка и формы возбуждающего импульса без дополнительных накоплений и усреднений сигнала. Были получены аналитические формулы, позволяющие учитывать расходимость Гауссова пучка в кристалле при расчете коэффициентов ДФП. Предложено использовать выражение для оптимального фокусного расстояния фокусирующей линзы, учитывающее параметры исследуемой среды.

*Список литературы*

1. Groenik J.A., Blasse G. Some new observations on the luminescence of  $\text{PbMoO}_4$  and  $\text{PbWO}_4$  // Journal of Solid State Chemistry. 1980. V.32. P.9–20.
2. Mikhailik V.B., Kraus H., Wahl D., Itoh M., Koike M., Bailiff I.K. One- and two-photon excited luminescence and band-gap assignment in  $\text{CaWO}_4$  // Phys. Rev. B. 2004. V.69. P.205110.
3. Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Карасик А.Я., Осико В.В., Соболев А.А., Чунаев Д.С., Пикосекундное вынужденное комбинационное рассеяние в кристаллах // ЖЭТФ. 2004. V.126. С.1073–1082.
4. Basiev T.T., Sobol A.A., Voron'ko Yu.K., Zverev P.G. Spontaneous Raman spectroscopy of tungstate and molybdate crystals for Raman lasers // Opt. Mater. 2000. V.15. P.205–216.



**Б.А. КУЗЯКОВ, Р.В. ТИХОНОВ**

*Московский государственный университет информационных технологий,  
радиотехники и электроники*

## **КОРРЕКЦИЯ РАБОТЫ ЛАЗЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АТМОСФЕРНЫХ ПОМЕХ**

В работе приводится вариант метода коррекции влияния атмосферных помех в лазерных телекоммуникационных каналах Земля – спутник. Показано, что с использованием методов коррекции, можно значительно снизить уровень влияния атмосферы на лазерные каналы.

**B.A. KUZYAKOV, R.V. TIKHONOV**

*Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and Electronics*

## **CORRECTION OF WORK OF LASER COMMUNICATION CHANNEL IN NEAR SPACE AT INFLUENCE OF ATMOSPHERICS**

The work contains a variant of the method of correcting the impact of atmospheric noise in the laser telecommunication channels Earth – satellite. It is shown that with the use of methods of correction, it is possible considerably to bring down the level of influence of atmospheric on laser channels.

Для реализации систем связи, между наземной станцией и низкоорбитальными космическими аппаратами определенными преимуществами обладает оптическая связь. При реализации лазерной связи [1, 2] в открытом пространстве между наземными станциями и космическими аппаратами (КА) приходится учитывать влияние динамики атмосферных условий. Наибольшую амплитуду колебаний лазерного луча в атмосфере  $\delta H$ , можно определить из следующего выражения [1]:

$$\delta H = k \cdot \Delta n \cdot C^{1,5} / a^{0,5}, \quad (1)$$

здесь,  $\Delta n$  - колебания показателя преломления воздуха;  $k$  – численный коэффициент;  $C$  - расстояние, пройденное лазерным лучом в атмосфере;  $a$  – диаметр объемов неоднородности воздуха.

Примеры предсказанных угловых ошибок траекторий КА приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Предсказанные угловые ошибки для 3-х траекторий КА

Максимальная предсказанная ошибка за 5 с	Траектория 1 (E <sub>max</sub> =40°)	Траектория 2 (E <sub>max</sub> =55°)	Траектория 3 (E <sub>max</sub> =70°)
Азимут	0.006°	0.022°	0.08°
Вертикаль	0.005°	0.008°	0.03°

В [3], для выбранной траектории, показано, что угол погрешности предсказания стремительно увеличивается при увеличении времени предсказания. Теоретически, используя разработанный алгоритм, можно получить точность прогноза выше, чем 0,1 градус в течение 5 секунд. Проведенные исследования [3, 4], показали подобные динамики изменения оценок ошибок прогноза, содержащих теоретические ошибки и ошибки выполнения без коррекции времени. Например, оценки теоретических ошибок прогноза (в градусах), без коррекции времени, изменяются от 0,025 – до 0,12 при изменении расчетной длительности от 1 до 10 с, при усредненной ошибке (а) в этом диапазоне ~ 0,05. Оценки прогноза ошибок выполнения (в градусах), без коррекции времени, изменяются от 0,07 – до 0,174 при изменении расчетной длительности от 1 до 10 с, при усредненной ошибке (в) в этом диапазоне ~ 0,1. После введения коррекции времени, максимальные величины ошибок не превышают 0,13 градуса, при усредненных величинах  $a^* \approx 0,05$ ,  $b^* \approx 0,05$  градуса в том же диапазоне изменения расчетной длительности от 1 до 10 с. Таким образом, при использовании методов коррекции, можно значительно снизить уровень влияния атмосферы на лазерные каналы.

*Список литературы*

1. Павлов Н.М. Коэффициент готовности атмосферного канала АОЛП и методы его определения // Фотон-Экспресс. 2006. №6. С.78-90.
2. Кузяков Б.А., Карпов М.А., Егорова Е.В., Тихонов Р.В., Муад Х.М. и др. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Электромагнитные волны и Электронные системы. 2013. Т.18. №12. С.38-43.
3. Bai S., Wang J., Qiang J., Zhang L., Wang J. Predictive filtering-based fast Reacqui-sition approach for space-borne acquisition, tracking, and pointing systems // Optics Express. 2014. V.20. No.22. P.26462-26475.
4. Jiang H., Wang J., Jia J., Qiang J.J. The design and research of coarse tracking system for space quantum communication // Opt. Commun. Technol. 2012. V.36. No.6. P.43-46.

В.Н. ЗВЕГИНЦЕВ, С.И. ИВАНОВ, А.П. ЛАВРОВ, И.И. САЕНКО  
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ МАКЕТА РАДИОФОТОННОЙ ДИАГРАММОФОРМИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ**

Приведены результаты экспериментальных исследований характеристик компонентов для построения макета радиофотонной диаграммоформирующей системы для управления положением луча фазированной антенной решетки.

V.N. ZVEGINTZEV, S.I. IVANOV, A.P. LAVROV, I.I. SAENKO  
*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

## **CHARACTERISTICS OF COMPONENTS IN MICROWAVE PHOTONIC BEAMFORMING SYSTEM SETUP FOR PHASED ARRAY ANTENNA**

Performances of key components used in the microwave photonic beam forming system setup for phased array antenna are given.

Аналоговые волоконно-оптические (ВО) линии передачи СВЧ-сигналов и их компоненты находят все более широкое применение при создании современных сверхширокополосных радиоэлектронных систем различного назначения (радиолокация, радиомониторинг и др.) [1, 2].

Для создания макета диаграммоформирующей системы (ДФС) сверхширокополосной фазированной антенной решетки (ФАР) нами была предложена схема, основанная на преобразовании СВЧ-сигналов в оптической диапазон, применении спектрального уплотнения (мультиплексировании) оптических каналов – технологии DWDM и использовании хроматической дисперсии оптического волокна в *S*-диапазоне [3, 4]. В этой ДФС для управления лучом ФАР фазирование ее излучателей реализуется во временной области – по принципу TTD (true time delay) – введением управляемых временных задержек в тракты передачи СВЧ-сигналов с оптическими несущими. Принцип TTD обеспечивает независимость положения луча ФАР от частоты и, таким образом, обработку в ФАР сигналов с мгновенной полосой частот до 4-х октав. В макете ДФС (см. [3]) используется набор лазеров (по числу элементов ФАР), длины волн которых фиксированы и распределены в соответствии со 100 GHz DWDM сеткой стандарта ITU, аналоговые

электрооптические модуляторы (ЭОМ) интенсивности оптического излучения, оптический мультиплексор, модуль фотоприемника (ФПМ) с полосой, охватывающей весь используемый диапазон длин волн, и отрезки одномодового волокна разной длины. Требуемые для работы ФАР взаимные временные задержки обрабатываемых СВЧ-сигналов реализуются как дисперсионные задержки  $T$  при распространении модулированных оптических несущих после их мультиплексирования в едином одномодовом волокне SMF-28 переключаемой длины  $L$ :  $T = D\Delta\lambda L$ ,  $D = 17 \text{ ps/nm/km}$ . Ранее нами были исследованы основные характеристики различных аналоговых ВО линий (MITEQ, Emcore и др.) – АЧХ, ФЧХ, уровень шума на выходе, динамический диапазон [3-5], и в результате выбраны как основа построения макета ДФС компоненты линий OTS-2 (Emcore) с полосой рабочих частот 18 GHz: 6 передатчиков, включающих излучатели с длинами волн от 1555.75 nm до 1551.72 nm (каналы сетки ITU №27..32) и ЭОМ, и широкополосный ФПМ. На рис. 1 приведены спектр 6 передатчиков (мощность каждого 10 dBm) и волновые характеристики 8-канального DWDM мультиплексора (AFW). Начальное выравнивание длин всех каналов ДФС до формирователя задержек выполнено включением в них дополнительных патч-кордов (длины от 200 до 600 nm). Макет ДФС испытан совместно с ФАР в диапазоне частот до 15 GHz.

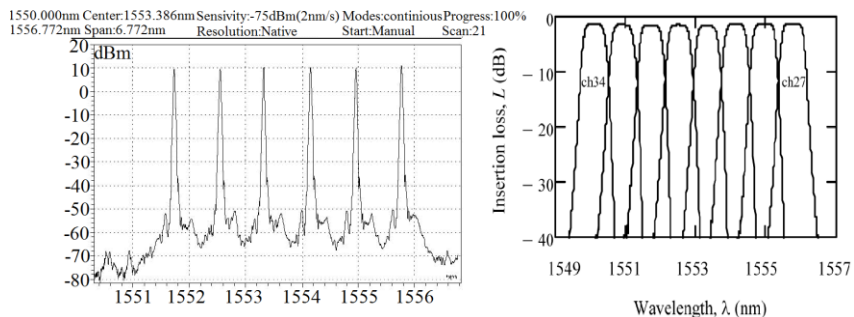


Рис. 1. Спектр 6 передатчиков (слева) и волновые характеристики 8-канального DWDM мультиплексора (справа)

#### Список литературы

1. Зайцев Д.Ф. Нанопотоника и её применение. М.: АКТЕОН. 2012.
2. Yao J.P. IEEE Photonics Society Newsletter, 2012. V.26, N3. P.5-12.
3. Lavrov A.P., Ivanov S.I., Saenko I.I. // Lect. Notes in Comp. Sc. 2014. V.8638. P.647-655.
4. Иванов С.И., Лавров А.П., Саенко И.И. // Оптический журнал. 2015. Т.82. №3. С.13-22.
5. Ivanov S.I., Lavrov A.P., Saenko I.I. // Proc. 25 Int. Conf. CriMiCo'2015. V.2. P.1033-1034.

И.С. МАЦАК, В.В. КАПРАНОВ, Е.М. КУДРЯВЦЕВ<sup>1</sup>  
*Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Королев*  
*<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## ПРЕЦИЗИОННОЕ ВЫЧИТАНИЕ ФОНА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

В работе рассмотрен способ повышения точности измерения характеристик лазерного пучка путем использования симметричной относительно пучка части кадра и отбора кадров на основе статистических сравнений параметров фона.

I.S. MATSAK, V.V. KAPRANOV, E.M. KUDRYAVTSEV<sup>1</sup>  
*S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia, Korolev*  
*<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## PRECISE BASELINE CORRECTION IN THE MESUREMENT OF CHARACTERISTICS OF LASER BEAMS

In this paper we describe a technique of increasing the accuracy of measurement of characteristics of laser beam by cutting a part of frame symmetric relative to the beam and selection of frames based on statistical comparison of parameters of background.

Разрабатываемая технология беспроводной передачи энергии лазерным излучением [1] предполагает создание узконаправленных лазерных пучков с помощью оптических систем формирования пучка, апертура которых может достигать 400 мм. Измерения характеристик лазерного пучка, необходимое для настройки и верификации оптической системы, могут быть проведены с помощью метода на основе экрана и промышленной камеры [2], как показано на рис. 1.

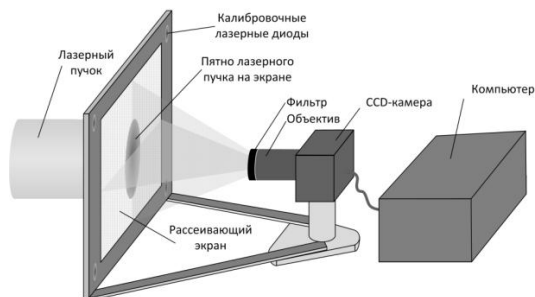


Рис. 1. Измерение характеристик широкоапертурного лазерного пучка

В работах [3, 4] была показана возможность точного измерения пучка и были приведены алгоритмы обработки данных. Однако, в ходе экспериментальных исследований характеристик широкоапертурного пучка при внефокальных смещениях источника излучения во внеосевой оптической системе наблюдалась дисперсия результатов измерений, значительно превышающая результаты, полученные путем моделирования, приведенных в [4].

Одним из наиболее влияющих факторов, вносящих погрешности, является точность вычитания базовой линии кадра. Поэтому в алгоритм обработки данных об относительном распределении плотности мощности был введен ряд изменений, в частности: вырезание симметричной относительно пучка области кадра и статистическое равенение средних значений фона и дисперсии (см. рис. 2). Сравнение средних значений и дисперсий в углах вырезанной части кадра реализовано в два этапа: на первом этапе значения сравниваются друг с другом, на втором – со значениями темнового кадра. При превышении заданного уровня кадры бракуются.

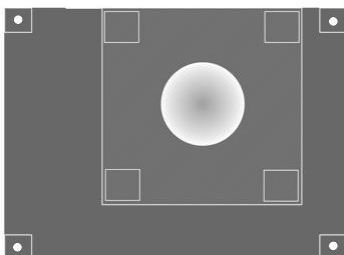


Рис. 2. Вырезание симметричной части кадра

Реализация предложенных мер позволила снизить дисперсию результатов и повысить повторяемость измерений в лаборатории на расстояниях до 100 метров.

#### *Список литературы*

1. Chertok В.Е., et al. Remote electric power transfer between spacecrafts by infrared beamed energy // AIP Conference Proceedings. 2011. V.1402. No.1. P.489-496.
2. Matsak I.S. Wide-aperture laser beam measurement using transmission diffuser: errors modeling // Proc. SPIE. 2015. V.9526. P.95260K.
3. Мацак И.С., Тугаенко В.Ю., Сергеев Е.С. Метод измерения диаметра широкоапертурного пучка лазерного излучения // Метрология. 2014. №4. С.13–24.
4. Мацак И.С., Кудрявцев Е.М., Тугаенко В.Ю. Моделирование погрешностей измерений диаметра широкоапертурного лазерного пучка с плоским профилем // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т.7. №1. С.113–124.

**Б.А. КУЗЯКОВ, Р.В. ТИХОНОВ**

*Московский государственный университет информационных технологий,  
радиотехники и электроники*

## **СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА НАДЕЖНОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ**

В работе рассматривается влияние турбулентной атмосферы на оптические каналы связи. Приведены примеры изменения профиля Бессель – Гауссового пучка в турбулентной атмосфере. Показано, что использование методов коррекции позволяет значительно повысить надежность оптической системы связи.

**B. A. KUZYAKOV, R. V. TIKHONOV**

*Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and Electronics*

## **MEANS TO REDUCE THE INFLUENCE OF TURBULENT ATMOSPHERE ON THE SAFETY OF THE OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM**

The influence of the atmosphere turbulence on optical communications channels inspects in the paper. Examples of the Bessel - Gaussian beam profile changes are in a turbulent atmosphere. It is shown that the use of correction methods can significantly improve the safety of the optical communication system.

На основе результатов численного моделирования с использованием параболического уравнения [1, 2] были рассчитаны дисперсия флуктуации интенсивности на оси сфокусированного гауссового пучка и его эффективный размер в турбулентной атмосфере в зависимости от безразмерного параметра  $D_s(2a) = 1,1C_n^2 k^2 L(2a)^{5/3}$ , ( $L$  - длина трассы,  $a$  - начальный радиус пучка,  $k=2\pi/\lambda$  - волновое число).

Один из методов повышения надежности системы передачи информации в атмосфере состоит в использовании бесселеподобных пучков (рис. 1), более подробно рассмотренное в [3]. Из рис. 1 видно, что при прохождении Бессель – Гауссового пучка с параметрами  $n = 2, 3$  в турбулентной атмосфере на расстоянии до  $z=400$  м, общий качественный вид пучка практически сохраняется. Это подтверждают оценки, приводимые в ряде других работ. При большей протяженности системы

связи, например,  $z = 5000$  м, профиль бесселеподобного пучка изменяется в большей мере (рис. 1), не ухудшая надежности связи.

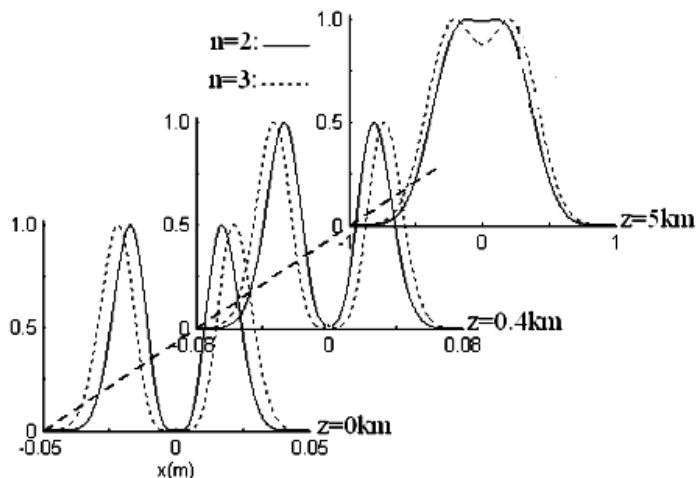


Рис. 1. Динамика профиля Бессель–Гауссового пучка в турбулентной атмосфере в зависимости от пройденного расстояния  $z$ , на вертикальных осях показана нормированная интенсивность пучков

Таким образом, надежность оптического канала связи, связанную с дисперсией флуктуации интенсивности на оси лазерного пучка в турбулентной атмосфере, можно повысить при использовании рассмотренных Бессель – Гауссовых пучков.

#### Список литературы

1. Милютин Е.Р. Атмосферные оптические линии связи в России // Вестник связи. 2008. №2. С.89-90.
2. Засовин Э.А., Кузяков Б.А., Тихонов Р.В., Шмелёв В.А. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // Научный журнал «Ученые записки РГСУ». 2014. №4. Т.1. С.175-181.
3. Zhu K., Zhou G., Li X., Zheng X., Tang H. Propagation of Bessel-Gaussian beams with optical vortices in turbulent atmosphere // Opt. Express. 2008. V.16. No.26. P.21315-21320.



М.А. ЯВОРСКИЙ, Е.В. БАРИШАК, К.Н. АЛЕКСЕЕВ  
*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ОСНОВАННАЯ НА ОУМ-КОДИРОВАНИИ УСТОЙЧИВАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СКРУЧЕННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ВОЛОКОН**

Мы показали, что наведенное крутильными напряжениями циркулярное двулучепреломление делает оптические вихри (ОВ) с целым орбитальным угловым моментом (ОУМ) устойчивыми к малым возмущениям в скрученных анизотропных и эллиптических волокнах. Мы полагаем, что такие волокна могут быть успешно использованы для устойчивой передачи информации на орбитальных степенях свободы света на значительные расстояния.

М.А. YAVORSKY, E.V. BARSHAK, C.N. ALEXEYEV  
*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **OAM-BASED ROBUST INFORMATION TRANSMISSION WITH TWISTED ANISOTROPIC FIBERS**

We show that induced by torsional stress circular birefringence makes the vortex beams with the well-defined orbital angular momentum robust against small perturbations. We believe that such fibers can be successfully utilized for the long-range robust transmission of information encoded in the light's orbital degrees of freedom.

Так как пропускная способность современных волоконных систем практически достигла своего предела, была сформулирована идея использовать недавно открытые орбитальные степени свободы оптического излучения [1]. Такой подход имеет принципиальные преимущества: (i) ультра высокая информационная емкость канала связи и (ii) принципиально новый уровень защиты данных. Для реализации данного подхода усилия исследователей были направлены на изучение распространения пучков с ОУМ — ОВ — в оптических волокнах [2, 3]. Было установлено, что неустойчивость ОВ препятствует полноценному использованию ОВ для передачи информации на значительные (10-ки км) расстояния. В результате данного исследования нам удалось теоретически показать, что проблему устойчивости можно решить путем использования в качестве передающей среды для ОВ скрученные анизотропные волокна с крутильными напряжениями.

Рассматриваются скрученные волокна двух типов: скрученное анизотропное волокно (САВ) и скрученное эллиптическое волокно (СЭВ). Диэлектрическая проницаемость в базисе линейных поляризаций имеет вид:  $\hat{\varepsilon}_i = \varepsilon_{\text{ИВ}} r \hat{1} + \hat{\varepsilon}_i + \hat{\varepsilon}_{\text{КМН}} r, \varphi$ . Здесь  $\varepsilon_{\text{ИВ}}$  описывает идеальное волокно; для САВ  $\hat{\varepsilon}_i = \hat{\varepsilon}_{\text{Ан}} z$  и описывает оптическую линейную анизотропию материала, ось которой однородно поворачивается в поперечном сечении; в случае СЭВ  $\hat{\varepsilon}_i = \hat{\varepsilon}_{\text{Эл}} r, \varphi, z$  учитывает, что поперечное сечение волокна есть эллипс; член  $\hat{\varepsilon}_{\text{КМН}}$  вызван влиянием крутильных механических напряжений через эффект фотоупругости.

Кратко приведем наиболее важные результаты для определенных соотношений параметров волокна [4]. В режиме интенсивно скрученного сильно анизотропного волокна (ИССАВ) моды эллиптически поляризованные ОВ с топологическим зарядом (ТЗ)  $\ell = \pm 1$ , тогда как для эллиптического волокна (ИССЭВ) моды представлены циркулярно-поляризованными анизотропными ОВ с ТЗ  $\ell = \pm 1$ . В случае интенсивно скрученного волокна (ИСВ) скрутка приводит к снятию вырождения постоянных распространения двух циркулярно-поляризованных ОВ,  $|1, 1\rangle$  и  $|-1, -1\rangle$  по знаку полного углового момента (спиновый+орбитальный), что является оптическим аналогом эффекта Зеемана.

Нами установлено, что наведенное крутильными механическими напряжениями циркулярное двулучепреломление делает ОВ с целым ОУМ на фотон устойчивыми в САВ и СЭВ по отношению к возмущениям анизотропии материала и формы, вращающимся вместе с директором внутренней анизотропии волокна, так и относительно пространственно не изменяющимся возмущениям. Это позволяет сделать вывод об устойчивости ОВ по отношению к малым внешним возмущениям со случайным распределением ориентации директора анизотропии, что позволяет предполагать возможность их успешного использования для передачи информации.

#### Список литературы

1. Molina-Terriza G., Torres J.P., Torner L. // Phys. Rev. Lett. 2001. V.88. P.013601.
2. Alexeyev C.N., Volyar A.V., Yavorsky M.A. // in Lasers, Optics and Electro-Optics Research Trends / ed. by L.I. Chen. New York: Nova Publishers, 2007. P.131–223.
3. Bozinovic N., Yue Y., Ren Y., Tur M., Kristensen P., Huang H., Willner A.E., Ramachandran S. // Science. 2013. V.340. P.1545.
4. Barshak E.V., Alexeyev C.N., Lapin B.P., Yavorsky M.A. // Phys. Rev. A. 2015. V.91. P.033833.

Н.С. СТЕРЛИКОВА, Д.Ю. ФЕДЯНИН

*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный*

## **КМОП ГИБРИДНЫЕ ПЛАЗМОННЫЕ ВОЛНОВОДЫ: ОТ ОПТИЧЕСКИХ К ПЛАЗМОННЫМ МЕЖСОЕДИНЕНИЯМ**

В докладе будет представлено детальное исследование оптических мод в Cu/SiO<sub>2</sub>/Si гибридных плазмонных волноводах на телекоммуникационной длине волны 1.55 мкм. Оптимизация геометрических параметров волновода показывает, что такие структуры могут одновременно сочетать в себе большие длины пробега (более 30 мкм) и малые размеры моды (менее 0.04 λ<sup>2</sup>). При этом сам плазмонный волновод изготавливается в стандартном КМОП-техпроцессе, используемом в микроэлектронике. Также будет продемонстрировано, что замена кремния на прямозонный полупроводник (InGaAsP) делает возможным полную компенсацию потерь при помощи электрической накачки.

N.S. STERLIKOVA, D. Yu. FEDYANIN

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

## **CMOS HYBRID PLASMONIC WAVEGUIDES: TOWARDS PLASMONIC INTERCONNECTS**

We will present a detailed study of Cu/SiO<sub>2</sub>/Si hybrid plasmonic waveguides at a free-space wavelength of 1.55 μm. Optimization of the geometrical parameters of the waveguide structure shows that CMOS hybrid plasmonic waveguides can simultaneously provide relatively long propagation lengths (> 30 μm) and small mode sizes (< 0.04 λ<sup>2</sup>) of the guided optical mode. Furthermore, replacing Si by a direct-bandgap semiconductor (InGaAsP), propagation losses can be fully compensated using electrical pumping.

Производительность современных многоядерных микропроцессоров определяется не столько частотой отдельных вычислительных ядер, сколько эффективностью передачи информации между ними, определяемой пропускной способностью используемых медных межсоединений (~1 Гбит/с). Поэтому для достижения рекордной производительности высоко-интегрируемых чипов уже необходим переход на принципиально новый тип межсоединений.

Для высокоскоростной передачи данных были предложены фотонные волноводы, которые, несмотря свои достоинства перед медными

соединениями, не могут быть также легко масштабируемы в силу дифракционного предела. Использование поверхностных плазмон поляритонов (ППП) дает возможность перешагнуть дифракционный предел, однако наличие больших омических потерь в плазмонных волноводах исключает их использование в качестве межсоединений [1]. Совместить высокую локализацию поля плазмонных волнопроводов с большой длиной пробега фотонных позволяют гибридные плазмонные волноводы на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник.

В этой работе проведено детальное исследование и оптимизация Cu/SiO<sub>2</sub>/Si гибридных плазмонных волнопроводов (рис. 1). Основные характеристики получены численно при помощи метода конечных элементов. Варьированием геометрических параметров, был найден баланс между длиной пробега и размером моды. Достигнута высокая локализация поля (размер моды менее  $0.04\lambda^2$ ) при относительно большой длине пробега (более 30 мкм). Замена кремния на прямозонный полупроводник (InGaAsP) и его электрическая накачка делают возможным дальнейшее увеличение длины пробега вплоть до полной компенсации потерь [2]. При этом требуемое оптическое усиление в полупроводнике составляет около  $1000 \text{ см}^{-1}$ .

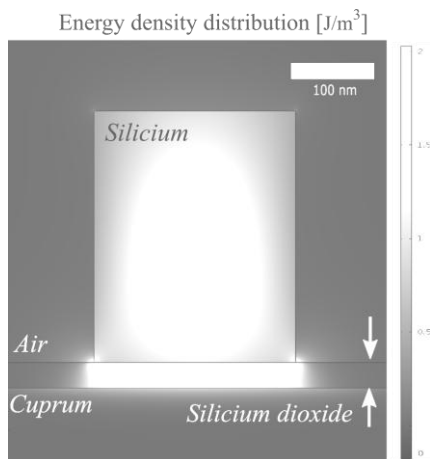


Рис. 1. Распределение плотности энергии в гибридном плазмонном волноводе

#### Список литературы

1. Krasavin A.V., Zayats A.V. Silicon-based plasmonic waveguides // Optics Express. 2010. V.18. P.11791-11799.
2. Svintsov D.A., Arsenin A.V., Fedyanin D.Yu. Full loss compensation in hybrid plasmonic waveguides under electrical pumping // Optics Express. 2015. V.23. P.19358-19375.

В.В. ПРОКЛОВ, О.А. БЫШЕВСКИЙ-КОНОПКО,  
А.В. ЛУГОВСКОЙ, А.Л. ФИЛАТОВ  
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА  
ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ  
ЛИНИИ O-CDMA НА ОСНОВЕ МНОГОПОЛОСНЫХ  
АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ**

Впервые выполнено экспериментальное исследование принципа передачи данных по O-CDMA линии, работающей на основе многополосных АО фильтров (МАОФ). При использовании МАОФ на базе  $\text{TeO}_2$  определены наиболее важные экспериментально реализуемые характеристики таких линий. Показано, что в случае использования униполярных 8-разрядных последовательностей Уолша, обеспечивается высокое качество разделения множественного доступа для пяти абонентов с процессорным выигрышем 17 дБ.

V.V. PROKLOV, O.A. BYSHEVSKI-KONOPKO,  
A.V. LUGOVSKOI, A.L. FILATOV  
*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

**AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE PRINCIPLE OF DATA  
TRANSMISSION ON O-CDMA LINES OPERATING  
ON THE BASIS OF MULTI-BAND ACOUSTOOPTIC FILTERS**

An experimental study of the principle of data transmission on O-CDMA lines operating on the basis of multi-band AO filters (MAOF) is for the first time carried out. By using  $\text{TeO}_2$  based MAOF the most important experimentally realized characteristics of these lines are determined. In the case of 8-bit Walsh sequences it provides high-quality of multiple access separation for five subscribers with 17 dB processor gain.

В последние годы наблюдается большой интерес к переносу принципов передачи данных с кодовым разделением каналов CDMA (Code Division Multiple Access) из радиодиапазона в оптический [1]. В данной работе реализована и экспериментально исследована линия O-CDMA, прототип которой был предложен в статье [2]. Передаваемый «суммарный» сигнал, эмитирующий передачу данных по пяти информационным каналам ( $k_i$ ), формировался с помощью цифрового синтезатора Tektronix AFG3252 и поступал на МАОФ-1, где излучение от

светодиода преобразовывалось в оптический сигнал с заданным энергетическим спектром. При этом, в соответствии с [2], дистанция между всеми восьмью соседними спектральными чипами в используемых 8-разрядными кодах Уолша устанавливались на уровне 2-х кратного критерия Рэлея. Выравнивание уровней чипов в бинарных оптических сигналах производилось по алгоритму, описанному в работе [3].

В Табл. 1 и 2 представлены экспериментальные результаты, когда на передающей стороне активен только первый или все пять абонентов, соответственно. В колонке МАОФ-1 показаны передаваемые коды/биты. В колонке МАОФ-2 – сигналы  $I_1, I_2$  на выходах каналов с прямым и комплементарным кодами, а также  $U_{\text{вых}}$  – выход балансного усилителя. Анализ Табл. 1 показывает, что экспериментально измеренная «неортогональность» прямых  $A_i$  и комплементарных  $\bar{A}_i$  кодов  $6/94 \approx 0.06$ . Из Табл. 2 видно, что достигнутый эквивалентный процессорный выигрыш, определяемый как увеличение отношения сигнал/шум от входа к выходу с учетом разброса  $U_{\text{вых}}$ , составляет  $10 \cdot \log((104/10)/(1/5)) \approx 17$  дБ. Работа поддержана грантами РФФИ №13-02-00179-а и №14-07-00163-а.

Таблица 1

Канал	МАОФ-1 (кодер)	МАОФ-2 (декодер)		
		$I_1(A_i * A_i)$	$I_2(A_i * \bar{A}_i)$	$U_{\text{вых.}} = (I_1 - I_2)$
$k_1$	$A_1(01010101)/+1$	100	6	94
$k_2$	–	52	50	2
$k_3$	–	51	52	-1
$k_4$	–	46	49	-3
$k_5$	–	55	51	4

Таблица 2

Канал	МАОФ-1 (кодер)	МАОФ-2 (декодер)		
		$I_1(A_i * A_i)$	$I_2(A_i * \bar{A}_i)$	$U_{\text{вых.}} = (I_1 - I_2)$
$k_1$	$A_1(01010101)/+1$	335	231	104
$k_2$	$A_2(00110011)/+1$	331	237	94
$k_3$	$\bar{A}_3(10011001)/-1$	234	338	-104
$k_4$	$\bar{A}_4(10100101)/-1$	228	332	-104
$k_5$	$A_5(01101001)/+1$	337	223	114

*Список литературы*

1. Yin H., Richardson D.J. Optical code division multiple access communication networks. Berlin: Springer, 2008.
2. Проклов В.В. и др. // Квантовая электроника. 2013. Т.43. №6. С.542-545.
3. Proklov V.V., Byshevski-Konopko O.A., Filatov A.L. // Tech. Phys. Let. 2015. V.41. P.987.

В.Я. МОЛЧАНОВ, С.И. ЧИЖИКОВ, К.Б. ЮШКОВ

*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва*

## **ВРЕМЕННОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДИСПЕРСИОННЫМ АКУСТООПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

В работе рассмотрен метод управления временным профилем chirпированных ультракоротких лазерных импульсов, основанные на спектральной модуляции излучения при дисперсионном акустооптическом взаимодействии. Экспериментально продемонстрирована модуляция излучения с частотой не менее 6 ГГц.

V. Ya. MOLCHANOV, S. I. CHIZHIKOV, K. B. YUSHKOV

*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*

## **TEMPORAL PROFILING OF THE ULTRASHORT LASER PULSES BY DISPERSIVE ACOUSTOOPTIC METHODS**

We report a method of controlling temporal profiles of chirped ultrashort laser pulses based on spectral modulation of emission during dispersive acousto-optic interaction. Modulation of emission with the bandwidth of 6 GHz was demonstrated in experiment.

Быстродействие акустооптических (АО) приборов определяется временем пробега фронта акустической волны через область акустооптического взаимодействия  $\tau_{ac}$ . Как правило, для коллинеарных и квазиколлинеарных эта величина лежит в диапазоне 10 – 100 мкс в зависимости от материала, в котором происходит АО-взаимодействие, и выбранной геометрии.

Акустооптические дисперсионные линии задержки (АОДЛЗ) – новый тип АО-приборов, в котором происходит взаимодействие широкополосного лазерного излучения УКИ с широкополосным ультразвуком [1]. Формирование в кристалле квази-ЛЧМ дифракционной решетки позволяет получить комплекснозначную функцию пропускания АОДЛЗ [2]. При этом комплексный аргумент функции пропускания определяет величину дисперсии, создаваемой АОДЛЗ, а модуль характеризует коэффициент пропускания на различных длинах волн.

Чирпированный УКИ представляет собой частотно-модулированный волновой пакет, длительность которого  $\Delta\tau_{opt}$  обратно пропорциональна длительности спектрально ограниченного импульса  $\tau_0$ , то есть прямо пропорциональна ширине оптического спектра  $\Delta\lambda$ :

$$\Delta\tau_{opt} = \sqrt{\tau_0^2 + \left(\frac{4D_2}{\tau_0}\right)^2} \approx \frac{4|D_2|}{\tau_0} \propto \Delta\lambda, \quad (1)$$

где  $D_2$  – коэффициент дисперсии второго порядка. Если чирпированный УКИ модулируется по спектру с характерным разрешением  $\delta\lambda$ , это приводит к его модуляции во временной области со временем нарастания

$$\delta\tau_{opt} = \frac{\delta\lambda}{\Delta\lambda} \Delta\tau_{opt}. \quad (2)$$

Таким образом, ширина полосы модуляции оптического излучения равняется

$$\Delta\nu = \frac{1}{\delta\tau_{opt}} = f \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\tau_{ac}}{\Delta\tau_{opt}}, \quad (3)$$

где  $f$  – центральная частота спектра ультразвука, а  $\lambda$  – центральная длина волны излучения. Эксперименты были выполнены на суб-пикосекундной тераваттной лазерной установке [3]. Спектрально-ограниченные импульсы длительностью  $\tau_0 = 200$  фс на длине волны  $\lambda = 1054$  нм были чирпированы стретчером до длительности  $\tau_{opt} = 1.6$  нс и имели спектр шириной  $\Delta\lambda = 4$  нм. В качестве устройства управления формой лазерных импульсов была разработана АОДЛЗ на монокристалле парателлурита со спектральным разрешением  $10^4$ . Временная форма чирпированных импульсов измерялась в нулевом дифракционном порядке. Оценка ширины полосы по формуле (3) при центральной частоте ультразвука  $f = 75$  МГц и длительности акустических импульсов  $\tau_{ac} = 51.2$  мкс, даёт величину  $\Delta\nu = 9.6$  ГГц.

Были получены экспериментальные результаты измерения фронтов модулированных импульсов при формировании АО-методом в спектре излучения модуляции гауссовой формы с различной шириной. Измеренное время нарастания и спада фронтов составляло приблизительно 170 пс, и было ограничено быстродействием фотодиода и осциллографа (полоса 6 ГГц). Таким образом, была продемонстрирована возможность временного профилирования лазерных импульсов с быстродействием, в 300 раз превышающим быстродействие АОДЛЗ.

#### Список литературы

1. Molchanov V.Ya., et. al. // Appl. Opt. 2009. V.48. P.C118.
2. Molchanov V.Ya., Yushkov K.B. // Opt. Express. 2014. V.22. P.15668.
3. Chizhikov S.I., et. al. // Laser Phys. Lett. 2013. V.10. P.015301.



**П.В. ЗИНИН, А.С. МАЧИХИН, А.А. БЫКОВ**

*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

## **МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЛМАЗОВ**

В работе описывается стенд для исследования оптических свойств алмазов. Стенд позволяет одновременно измерять флуоресценцию и Рамановское рассеяние. Зная значения данных параметров, мы можем проводить химический анализ, изучать строение и состав вещества. В нашем случае можно судить о качестве исследуемых алмазов. Технология применима в горнодобывающей и ювелирной промышленности.

**P.V. ZININ, A.S. MACHININ, A.A. BYKOV**

*Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow*

## **MULTIMODAL STAND FOR RESEARCH OF THE OPTICAL PROPERTIES OF DIAMONDS**

The paper describes a stand for researching of optical properties of diamonds. It allows us to measure simultaneously spectra of the fluorescence and the Raman shift. Spectra of the fluorescence and the Raman shift are considered as a chemical fingerprint a particular molecule or material, and therefore they can be used for a chemical analysis, to study the structure, composition of minerals and functional materials, and to evaluate the quality of diamonds. The developed method can find an application in mining and jewelry industries.

В работе описывается стенд для исследования оптических свойств алмазов. Стенд (рис. 1) состоит из трех блоков: (а) механический блок для позиционирования образца, (б) оптический блок для создания изображения образца и позиции лазерного пучка на образце, а также (в) блок флуоресцентной спектроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). Стенд позволяет одновременно измерять флуоресценцию и КР рассеяние алмазов (рис. 2). Знание спектров флуоресценции с совокупности с КР спектрами позволяет провести полную идентификацию алмаза: подтвердить подлинность, алмаза, отличить искусственный от натурального, а также установить тип алмаза и в нашем случае можно судить о качестве исследуемых алмазов. Технология применима в горнодобывающей и ювелирной промышленности [1]. Измерения проводятся акустооптическими (АО) спектрометрами. Данный

тип приборов был выбран по ряду параметров: высокая светосила, высокое пространственное и спектральное разрешение, возможность модуляции передаточной функции выгодно отличают их от приборов, построенных на других физических принципах, а быстрая произвольная спектральная перестройка позволяет строить на их базе спектрально адаптивные системы. В сравнении с другими оптическими фильтрами, позволяющими одновременно анализировать пространственные и спектральные свойства объекта, например, жидкокристаллическими фильтрами, АО фильтр обеспечивает перестройку в более широком спектральном диапазоне (например, 0,4-0,8 мкм) с весьма высоким для таких компактных устройств разрешением (до 0,1 нм). Несмотря на нелокальный характер дифракции, обусловленный тем, что дифракция происходит на объемной решетке, АО фильтры обеспечивают неплохое разрешение (до 1000 разрешимых положений по каждой из координат) [2].

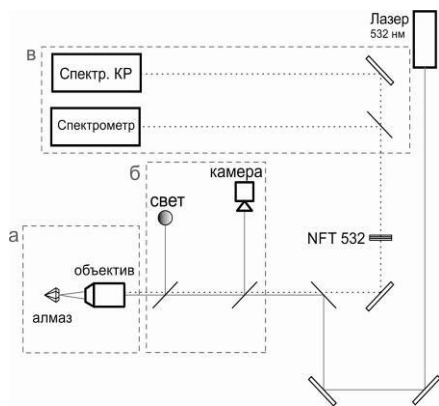


Рис. 1. Схема установки

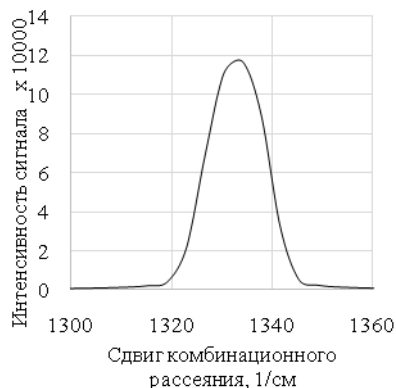


Рис. 2. Комбинационное рассеяние

Данное исследование поддержано грантом РФФИ 15-37-20646.

#### Список литературы

1. Carter J.C., Scaffidi J., Burnett S., Vasser B., et al. Stand-off Raman detection using dispersive and tunable filter based systems // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2005. V.61. P.2288-2298.
2. Goutzulis A., Rape D. Design and fabrication of acousto-optic devices. Dekker, 1994.

Е.М. КУДРЯВЦЕВ, С.Д. ЗОТОВ, В.В. РОЩУПКИН<sup>1</sup>

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

*<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

## **ДВЕ МОДЕЛИ ПОЯВЛЕНИЯ МНОГИХ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В СТЕКЛЕ («ЭФФЕКТ ГРЕБЁНКИ») ВО ВРЕМЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА**

Показано, что большое количества акустических событий, появляющихся в стекле в течение СО<sub>2</sub>-лазерного импульса, нельзя объяснить «кипением» стекла в фокальном пятне, но можно – воздействием возбужденных в этих условиях Медленных уединённых упругих волн с дискретными скоростями.

E.M. KUDRIAVTSEV, S.D. ZOTOV, V.V.ROSHCHUPKIN<sup>1</sup>

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Baykov Institute of Metallurgy and Material Science of the RAS, Moscow*

## **TWO MODELS OF MANY ACOUSTIC PULSES EXCITATION IN GLASS DURING CO<sub>2</sub>-LASER PULSE (“COMB EFFECT”)**

It is shown that a lot of acoustical events in the glass during CO<sub>2</sub>-laser pulse could not be explained by “boiling” of glass inside of focal spot, but it could be explained by action of excited in that conditions Slow Solitary Elastic Waves with discrete velocities.

Необычная картина («гребёнка») из большого числа (20-30) акустических событий (АС) наблюдалась (с помощью акустического датчика) во время действия СО<sub>2</sub> лазерного импульса (ЛИ) – на стекло (см. рис. 2 в [1] и рис. 1 здесь, - в средней, а также нижней, сильно разрешённой его частях, сверху там же приведены формы ЛИ данных опытов). На первый взгляд, «гребёнка» состоит из *хаотически повторяющихся* АС. А при наличии следов плавления и растрескивания стекла в фокальном пятне, это может вызвать представление о кипении стекла как причине наблюдаемой серии АС [1]. В [1] подробно обсуждается *возможность* реализации автоколебательного режима, который бы обуславливал наблюдаемый характер повторяющихся АС. Однако, в дальнейших опытах эта возможность не подтвердилась. Оказалось, что при несколько изменённых условиях (нетронутая поверхность вместо матированной) те же образцы стекла могли не дать ни одного АС во время ЛИ (см. рис. 1 в верхней его части).

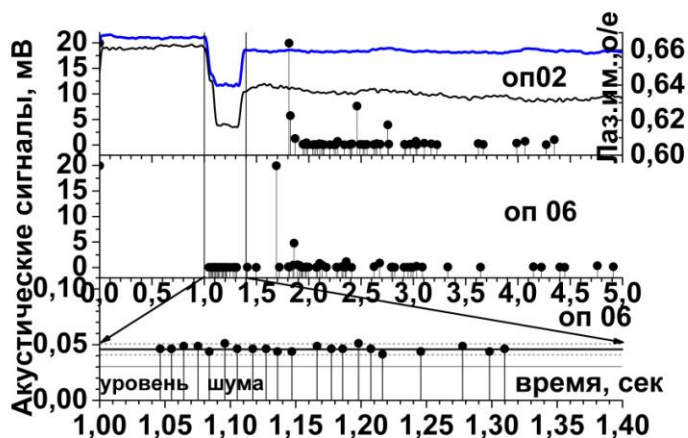


Рис. 1

Из рис. 1 видно, что после ЛИ возникало много рядовых АС, но сначала шли мощные АС. Все эти «запоздавшие» АС вызваны образованием трещин (одной или нескольких) в стекле, неоднородно нагретом поглощённым ЛИ. Важно, что как АС во время ЛИ, так и эти АС после ЛИ и после мощных трещин, удаётся описать как обусловленные одной и той же причиной. Ею является воздействие на образец стекла компонентов медленных уединённых упругих волн (МУУВ) с дискретными скоростями [3, 4]. Они, в свою очередь, были вызваны в одном случае ЛИ, а в другом – мощными трещинами в стекле.

Авторы благодарят А.А. Лебедева (оформление материала работы), М.М. Ляховицкого, М.А. Покрасина, Дж. Нишанова за помощь в работе, А.А. Кузнецова, Э.Н. Лоткову за полезное обсуждение результатов. Работа поддержана грантами РФФИ 10-08-01003 и 14-08-00981.

#### Список литературы

1. Зотов С.Д., Кузнецов А.А., Лебедев А.А. // Инженерная физика. 2015. №10. С.20-26.
2. Kudriavtsev E.M. // Proc. of XIII sess. of Russ. Acoustic Society. 2003. V.1. P.204-207.
3. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д., Лебедев А.А., Ляховицкий М.М., Рошупкин В.В. // Фотон-экспресс. 2015. №.6 (126). С.224-226.
4. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., Lebedev A.A., Lyachovitsky M.M., Roshchupkin V.V. // Book of Abstracts of ICPPP18. Novi Sad, Serbia, 2015. P.82-83.

Д.А. ШЕЛЕСТОВ, И.А. ДОЛОНОВ, К.И. КОШЕЛЕВ, А.Б. ПНЕВ  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ХРАНИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ НА ЛИНИИ P(16) $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Разработан хранитель частоты на основе узкополосного полупроводникового лазера, стабилизированного амплитудным методом по линии P(16) изотопа ацетилена  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  (длина волны – 1542,386 нм). Предложен метод повышения надёжности работы хранителя частоты на основе использования резервного репера частоты (атермальная волоконная решетка Брегга) и алгоритма автоматического выбора репера. Продемонстрирована девиация Аллана на уровне  $3 \cdot 10^{-9}$  за время усреднения 1 мин.

D.A. SHELESTOV, I.A. DOLONOV, K.I. KOSHELEV, A.B. PNIQV  
*Bauman Moscow State Technical University*

## **SPACE FREQUENCY KEEPER BASED ON LINE P(16) OF $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$**

Frequency keeper based on narrow linewidth semiconductor laser stabilized by line P(16) of acetylene isotope  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  (wavelength – 1542,386 nm) was developed. We offered reliability increasing method based on using of secondary spectral reference (athermal fiber bragg grating) and automatic selection algorithm. On 1 min averaging time Allan deviation demonstrated on the level of  $3 \cdot 10^{-9}$ .

Примером применения хранителя частоты является использование лазера в качестве референтного канала в ИК фурье-спектрометре, предназначенного для решения гидрометеорологических задач.

Высокостабильные линии различных газов широко используются в метрологии. К стандартным реперным газам относят  $^{12}\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{H}^{13}\text{CN}$ ,  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ . Зависимость спектральных линий от различных параметров подробно изучены [1] и с совершенствованием измерительных техник регулярно обновляются. Спектральная линия P(16) изотопа ацетилена  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  представляет собой сильный резонанс поглощения (более 6 дБ) и используется в стандартах частоты различного класса во многих странах [2, 3]. В данной работе представлен полупроводниковый лазер, стабилизированный по ацетилену амплитудным методом по склону реперной линии. Сам по себе лазер стабилизирован по току и по температуре, а изменение рабочей точки по

температуре позволяет осуществить необходимую перестройку длины волны. Цифровая система управления осуществляет сканирование газовой ячейки, детектирует резонанс и поддерживает положения частоты на резонансе. Т.к. данная разработка предназначена для использования в условиях космоса, то был произведен анализ критичности отказов подсистем лазера. Одним из критичных факторов является риск полной или частичной разгерметизации кюветы. В работе предложено использование резервного, хотя и менее добротного, спектрального репера – атермальной волоконной брегговской решетки, а также был разработан алгоритм, который обнаруживает ослабление резонанса в газовой ячейке, непременно сопутствующее разгерметизацию. Полученная девиация Аллана (рис. 1) показывает, что наиболее точным промежутком усреднения для системы является 1 минута, после чего начинает сказываться температурный уход газовой кюветы.

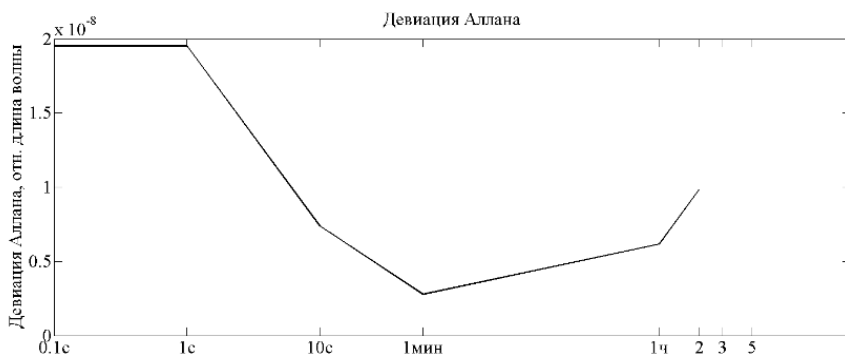


Рис. 1. Стабильность частоты при стабилизации по ацетилену

#### Список литературы

1. Herman M., Camparque A., El Idrissi M.I., Auwera J.V. Vibrational spectroscopic database on acetylene // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2003. V.32. No.3. P.921-1361.
2. Labachellerie M, Nakagava K., Ohtsu M. Ultranarrow  $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$  saturated-absorption lines at 1.5  $\mu\text{m}$  // Optics Letters. 1994. V.19. No.11. P.840-842.
3. Edwards C.S., Patel P., Barwood G.P., Gill P. Development of a compact 1.54  $\mu\text{m}$  acetylene standard at NPL // Precision Electromagnetic Measurements Digest. 2008. P.294-295.

В.А. СЕЛЕЗНЕВ<sup>1,2</sup>, А.В. ДИВОЧИЙ<sup>1,2</sup>, Ю.Б. ВАХТОМИН<sup>1,2</sup>,  
П.В. МОРОЗОВ<sup>1,2</sup>, Д.Д. ВАСИЛЬЕВ<sup>3</sup>, К.М. МОИСЕЕВ<sup>3</sup>,  
Е.И. МАЛЕВАННАЯ<sup>3</sup>, К.В. СМИРНОВ<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет

<sup>2</sup>ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва

## **СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ДЕТЕКТОР ОДИНОЧНЫХ ИК-ФОТОНОВ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК WSi**

Нами была разработана технология осаждения пленок WSi с толщинами в 5-9 нм, с высокими значениями температуры сверхпроводящего перехода ( $T_c \sim 4$  К) и плотностями критического тока ( $j_c > 2 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>). Эксперименты по созданию WSi сверхпроводниковых однофотонных детекторов показали, что их внутренняя квантовая эффективность на длинах волн 1.3-1.55 мкм достигает значений близких к 100 %, а квантовая эффективность, приведенная к оптическому вводу излучения, ограничена поглощением фотонов сверхпроводником и составляет >25%.

V.A. SELEZNEV<sup>1,2</sup>, A.V. DIVOCHIY<sup>1,2</sup>, Yu.B. VACHTOMIN<sup>1,2</sup>,  
P.V. MOROZOV<sup>1,2</sup>, D.D. VASIL'EV<sup>3</sup>, K.M. MOISEEV<sup>3</sup>,  
E.I. MALEVANNAYA<sup>3</sup>, K.V. SMIRNOV<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Pedagogical University

<sup>2</sup>CJSC "Superconducting Nanotechnology", Moscow

<sup>3</sup>Bauman Moscow State Technical University

<sup>4</sup>National Research University "Higher School of Economics", Moscow

## **SUPERCONDUCTING DETECTOR OF IR SINGLE PHOTONS BASED ON THIN WSi FILMS**

We have developed deposition technology for WSi thin-films with thickness of 5-9 nm, high value of superconducting transition temperature  $T_c \sim 4$  K, and critical current density  $j_c > 2 \cdot 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. Superconducting single-photon detectors based on WSi film have the internal quantum efficiency close to 100% at wavelengths of 1.3-1.55 mkm. However, the system quantum efficiency reaches value above 25% due to absorption losses in the superconducting film.

С момента открытия способности регистрации одиночных фотонов видимого и ИК-излучения сверхпроводниковыми тонкопленочными наноструктурами [1] многие научно-исследовательские группы были вовлечены в изучение открытого эффекта, создание на его основе эффективных однофотонных детекторов (SSPD) и повышение их эксплуатационных характеристик, использование сверхпроводниковых детекторов во множестве применений [2]. Одним из перспективных направлений повышения квантовой эффективности (QE) SSPD является использование новых материалов. Традиционно SSPD изготавливаются на основе ультратонких пленок NbN [1], технология осаждения и структурирования которых является не тривиальной задачей.

Технология осаждения тонких пленок WSi, развитая нами в представляемой работе, более проста и, при равной толщине, пленки WSi имеют более высокий коэффициент поглощения излучения по сравнению с NbN. Дополнительно, WSi имеет более низкую критическую температуру сверхпроводящего перехода ( $T_c$ ), что также должно способствовать увеличению QE SSPD в соответствии с моделью его работы [3]. Для нанесения пленок WSi был использован метод магнетронного распыления Si и W одновременно с двух магнетронов. Экспериментальным путем установлено, что состав  $W_{0.76}Si_{0.24}$  является оптимальным относительно максимальной  $T_c$  и минимального поверхностного сопротивления пленок, осажденных на подложки Si/SiO<sub>2</sub>. Созданные методами прямой электронной литографии и плазмохимического травления WSi SSPD стандартной топологии [1] и различной толщины (5 нм, 7 нм и 9 нм) были сопряжены с одномодовым волокном.

Проведенные при температуре  $\sim 1.6$  К и  $\lambda = 1.55$  мкм измерения SSPD различной толщины показывают, что детекторы, изготовленные из WSi толщиной 5 нм и 7 нм, достигают внутренней QE близкой к 100 %. при темновом счете менее  $1 \text{ с}^{-1}$ .

#### *Список литературы*

1. Golt'sman G., et. al. // Applied Physics Letters. 2001. V.79. P.705-707.
2. Hadfield R.H., et. al. // Applied Physics Letters. 2006. V.89. No.24. P.241129.
3. Bulaevskii L.N., et. al. // Physical Review B. 2012. V.85. No.1. P.014505.



Е.А. ДОБРЕЦОВА, К.Н. БОЛДЫРЕВ, Е.Ю. БОРОВИКОВА<sup>1</sup>,  
А.Е. САВОН<sup>1</sup>, Д.В. ДЕЙНЕКО<sup>2</sup>

*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

<sup>2</sup>*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва*

## ОПТИЧЕСКИЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ГАЛЛИЕВЫХ БОРАТОВ СО СТРУКТУРНЫМ ТИПОМ ХАНТИТА

Кристаллы редкоземельных галлиевых боратов  $RGa_3(BO_3)_4$ , где  $R = Nd, Sm - Er$  или  $Y$ , выращены методом спонтанной кристаллизации из раствора в расплаве. Все галлиевые бораты исследованы методом ИК-спектроскопии. ИК спектры редкоземельных галлиевых боратов отнесены к структуре  $R32$ . Небольшое содержание моноклинной фазы наблюдается в  $Eu$ - и  $Ho$ -боратах. Люминесцентные свойства этих боратов исследованы при комнатной температуре. Получены времена затухания люминесценции для наиболее интенсивных переходов в  $EuGa_3(BO_3)_4$  (~614 нм) and  $HoGa_3(BO_3)_4$  (~434 нм), которые составили 940 мкс and 140 мкс, соответственно. На основе люминесцентных данных и результатов исследования методом оптической спектроскопии в ИК и видимой области определена схема энергетических уровней  $Eu^{3+}$  в  $EuGa_3(BO_3)_4$ . Установлена граница УФ поглощения для  $RGa_3(BO_3)_4 - 300$  нм.

Е.А. DOBRETSOVA, K.N. BOLDYREV, E.Yu. BOROVIKOVA<sup>1</sup>,  
A.E. SAVON<sup>1</sup>, D.V. DEYNEKO<sup>2</sup>

*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Shubnikov Institute of Crystallography of the RAS, Moscow*

## OPTICAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF HUNTITE-LIKE GALLIUM BORATES

Crystals of the rare-earth gallium borates  $RGa_3(BO_3)_4$ , where  $R = Nd, Sm - Er$ , or  $Y$ , were grown by the flux method. All grown gallium borates were investigated by infrared (IR) spectroscopy technique in a middle and far IR region. IR spectra of rare-earth gallium borates correspond to a pure rhombohedral ( $R32$ ) polytype structure. Small inclusions of a monoclinic phase were detected only in  $Eu$  and  $Nd$  compounds. Luminescence of  $Eu$  and  $Ho$  gallium borates was studied at room temperature. The measured decay times for the most intensive emission lines of  $EuGa_3(BO_3)_4$  (~614 nm) and  $HoGa_3(BO_3)_4$  (434 nm) are 940  $\mu s$  and 140  $\mu s$ , respectively. The scheme of crystal-

field energy levels of  $\text{Eu}^{3+}$  in  $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$  was built on the basis of the temperature-dependent optical transmission measurements combined with the luminescence data. The measured UV absorption edge for  $\text{RGa}_3(\text{BO}_3)_4$  is at about 300 nm.

В настоящее время существует растущая потребность в синем и УФ лазерах в некоторых развивающихся областях практического применения. Уменьшение длины волны лазерного излучения имеет важное значение при оптической записи и обработке информации (для лучшего разрешения и более высокой плотности данных), в медицинских целях (для селективного поглощения света и фотоэффектов), в охране окружающей среды (для разработки дистанционных датчиков). Интересное явление представляет собой самоудвоение и самосмещение частот в лазерном кристалле. Эти свойства можно использовать при разработке микролазеров с диодной накачкой, где небольшой кристалл с самоудвоением или самосмещением частот крепится к выходному концу лазерного диода. Редкоземельные алюминиевые бораты со структурным типом хантита обладают подобными свойствами. Соединения широко изучены, и результаты их исследования представлены во многих статьях (напр., [1, 2]).

В настоящей работе исследованы оптические и люминесцентные свойства редкоземельных галлиевых боратов семейства хантитов. Был проведен теоретико-групповой анализ колебаний  $\text{BO}_3^{3-}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{R}^{3+}$  ионов. Установлена изоструктурность редкоземельных алюмо- и галлоборатов (пр.гр.  $R32$ ). Люминесцентные свойства боратов исследованы при комнатной температуре. Получены времена затухания люминесценции для наиболее интенсивных переходов в  $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (~614 нм) and  $\text{HoGa}_3(\text{BO}_3)_4$  (~434 нм), которые составили 940 мкс and 140 мкс, соответственно. На основе люминесцентных данных и результатов исследования методом оптической спектроскопии в ИК и видимой области определена схема энергетических уровней  $\text{Eu}^{3+}$  в  $\text{EuGa}_3(\text{BO}_3)_4$ . Установлена граница УФ поглощения для  $\text{RGa}_3(\text{BO}_3)_4 - 300\text{нм}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант № 14-12-01033) и стипендии Президента РФ (СП-754.2015.1)

*Список литературы*

1. Foldvari I. // Journal of Luminescence. V.102–103. 2003. P.395-401.
2. Cavalli E. // Journal of Luminescence. V.102–103. 2003. P.216-219.

**А.А. ВЫШНЕВЫЙ, Д.Ю. ФЕДЯНИН**

*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный*

## **ОХЛАЖДЕНИЕ АКТИВНЫХ ПЛАЗМОННЫХ НАНОСТРУКТУР С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ**

Поверхностные плазмон-поляритоны обладают субволновой локализацией, в силу чего являются перспективной основой для создания оптоэлектронных устройств нового поколения. Однако оптическое поглощение в металле ограничивают длину пробега несколькими десятками микронметров. Потери можно компенсировать оптическим усилением в активной среде, созданным при помощи эффективной и компактной электрической накачки. При этом плотность тока, необходимая для полной компенсации потерь, превышает пороговые токи в полупроводниковых лазерах, что может приводить к перегреву плазмонных компонентов. Мы впервые рассматриваем тепловыделение и теплоотвод в плазмонных наноструктурах с полной компенсацией потерь и демонстрируем, как необходимо применять системы охлаждения, подобные используемым для охлаждения процессоров, для эффективного теплоотвода.

**A.A. VYSHNEVYY, D. Yu. FEDYANIN**

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

## **COOLING OF ELECTRICALLY PUMPED ACTIVE PLASMONIC NANOSTRUCTURES**

Surface plasmon polaritons demonstrate deep-subwavelength confinement at the chip scale, which makes them prospective candidates for the next generation integrated optoelectronic circuits. However, optical absorption in metal limits their propagation length to few tens of micrometers. Propagation losses can be compensated by optical gain in the adjacent active medium, created by efficient and compact electrical pumping. However, the current density required for full loss compensation exceeds threshold currents of semiconductor lasers and may cause overheating. We study for the first time heat generation and heat transport in the active plasmonic waveguide and demonstrate how to use cooling systems similar to those of CPU for efficient heat removal.

Ускорение современных вычислительных систем требует внедрения оптических компонентов в связи с достижением пределов пропускной способности электрических медных межсоединений. Решение этой задачи вызвало активное развитие интегрированной оптоэлектроники, вплоть до запуска технологических линий по производству чипов, содержащих

оптические и электронные компоненты [1]. Характерные размеры оптических компонентов ограничены снизу размерами порядка длины волны (дифракционный предел), что ограничивает степень интеграции компонентов на кристалле. Дальнейшее уменьшение размеров оптических компонентов возможно только за счет преодоления дифракционного предела, что может быть достигнуто путем перехода от объемных к поверхностным электромагнитным волнам, распространяющимся вдоль границы раздела между металлом и диэлектриком (или полупроводником) - поверхностным плазмон-поляритонам (ППП). Однако поглощение электромагнитного поля в металле является высоким и ограничивает длину пробега ППП несколькими десятками микрометров, что недостаточно для практических применений. Электрическая схема компенсации потерь позволяет увеличить длину пробега и сохранить малый размер устройства [2]. При этом ток, необходимый для полной компенсации потерь, оказывается порядка 10 кА/см<sup>2</sup>, что превышает пороговые токи в полупроводниковых лазерах.

В наноразмерном плазмонном волноводе, в котором омические потери полностью компенсированы электрической накачкой, мощность тепловыделения составляет 0,2 Вт на 1 см длины. Численное моделирование теплоотвода волновода, расположенного на чипе размером 1 см, за счет естественной конвекции, предсказывает, что его нагрев будет равен 100 К. Мы показываем, что использование систем охлаждения, аналогичных применяемым для охлаждения процессоров, позволит понизить нагрев волноводов до единиц Кельвин.

*Список литературы*

1. Coteus P.W., Knickerbocker J.U., Lam C H., Vlasov Y.A. Technologies for exascale systems // IBM J. Res. Dev. 2011. V.55. No.14. P.1–12.
2. Fedyanin D.Yu., Krasavin A.V., Arsenin A.V., Zayats A.V. Surface plasmon polariton amplification upon electrical injection in highly integrated plasmonic circuits // Nano Lett. 2012. V.12. P.2459-2463.

О.А. СУПРУНОВА, А.В. ЗАСЕДАТЕЛЕВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РАЗМЕРНО-ЗАВИСИМАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА**

В работе проведено моделирование нелинейных оптических свойств наночастиц золота в поле мощного лазерного излучения. Установлена зависимость комплексной диэлектрической проницаемости наночастиц золота от их размера и интенсивности возбуждающего излучения.

O.A. SUPRUNOVA, A.V. ZASEDATELEV, A.A. CHISTYAKOV

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

## **SIZE-DEPENDENT NONLINEAR PERMITTIVITY OF GOLD NANOPARTICLES**

In this paper we provide a modeling nonlinear optical properties of gold nanoparticles in the field of high-power laser radiation. The dependence of the complex permittivity of gold nanoparticles on their size and intensity of the exciting radiation.

Оптические свойства металлических наночастиц представляют собой большой интерес. В первую очередь это связано с явлением усиления локального поля, что позволяет существенно повысить эффективность протекания фотостимулированных процессов в хромофорах. Это нашло своё применение в лазерной технике, фотовольтаике, изготовлении светодиодов, криминалистике (создание эффективных метящих препаратов), медицине (биометки).

В поле мощного лазерного излучения диэлектрическая проницаемость металлических наночастиц становится функцией от интенсивности:

$$\varepsilon = \varepsilon_{Au}^0 + |f|^2 \chi_{Au}^{(3)} I C_2,$$

где  $\varepsilon_{Au}^0$  - часть, независящая от интенсивности,  $|f|^2$  - квадрат модуля фактора локального поля,  $I$  - интенсивность возбуждающего излучения,  $C_2$  - коэффициент перехода из Гауссовой системы единиц в СИ,  $\chi_{Au}^{(3)}$  - собственная нелинейная восприимчивость золотой наночастицы. Механизмы возникновения собственной нелинейной восприимчивости различны при использовании разных режимов возбуждения. В случае использования источника с достаточно большой энергией в импульсе на

частоте близкой к частоте плазмонного резонанса, энергия, поглощаемая электронным газом, становится достаточной для увеличения его температуры, что изменяет вероятности переходов, и изменяются оптические свойства. В расчётах была использована собственная нелинейная восприимчивость золота при длине волны возбуждающего излучения 532 нм  $\chi_{Au}^{(3)} = (-1+5i) \times 10^{-8}$  esu из работы [1]. Фактор локального поля – отношение поля, усреднённого по объёму частицы, к полю, падающему на частицу. Определяется геометрией металлических наночастиц и оптическими свойствами среды. Его расчёт был проведён в рамках теории Ми.

В результате работы установлено, что модуль действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости принимает наибольшее значение при радиусе частиц 25 нм. Наибольшим нелинейным откликом обладают частицы с радиусом от 10 до 40 нм. Это можно объяснить тем, что для малых частиц наблюдается малый диэлектрический контраст, что соответствует малому усилению поля вблизи частиц радиусом до 10 нм, следовательно, малый нелинейный отклик. Для частиц больших размеров поле начинает экранироваться, таким образом, наблюдается уменьшение нелинейного отклика металлических частиц радиусом более 40 нм.

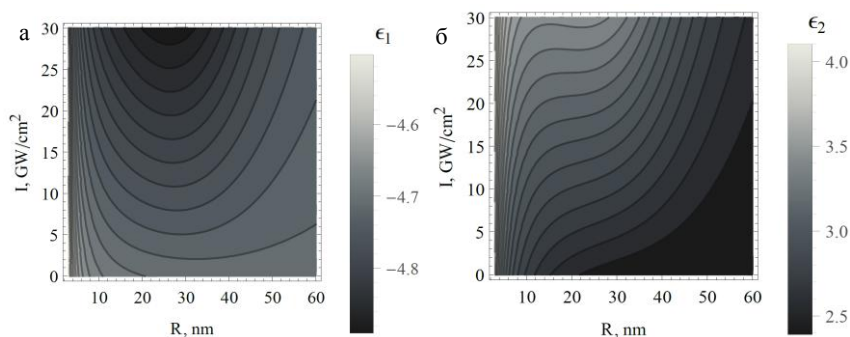


Рис. 1. Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости наночастиц золота от их размера и интенсивности возбуждающего излучения

#### Список литературы

1. Smith D.D., et. al. Z-scan measurement of the nonlinear absorption of a thin gold film // Journal of applied physics. 1999. V. 86. No.11. P.6200-6205.

Е.И. КОНСТАНТИНОВА, А.Ю. ЗЮБИН<sup>1</sup>,  
В.А. СЛЕЖКИН, В.В. БРЮХАНОВ<sup>1</sup>

*Калининградский государственный технический университет  
<sup>1</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*

## **СПЕКТРОСКОПИЯ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА МАТОВОЙ СТЕКЛЯННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Исследованы спектры комбинационного рассеяния (КР) наночастиц серебра боргидридного золя ( $R=8$  нм) на матовой стеклянной поверхности. Обнаружено, что в КР-спектрах образцов с наночастицами серебра, прокаленными при температуре  $T=350$  °С, появляются дополнительные колебательные полосы. Наблюдаемый эффект объясняется сшиванием матовой поверхности стекла с наночастицами серебра.

E.I. KONSTANTINOVA, A.Yu. ZYUBIN<sup>1</sup>,  
V.A. SLEZHKIN, V.V. BRYUKHANOV<sup>1</sup>

*Kaliningrad state technical university  
<sup>1</sup>Immanuel Kant baltic federal state university, Kaliningrad*

## **RAMAN SPECTROSCOPY OF SILVER NANOPARTICLES ON MATTE GLASS SURFACE**

Raman spectra of silver nanoparticles the borohydride sol ( $R = 8$  nm) on matte glass surface are investigated. It has been found that the Raman spectra of the samples with silver nanoparticles calcined at temperature  $T = 350$  °C have additional vibrational bands. The observed effect by crosslinking matte glass surface with silver nanoparticles is explained.

Наночастицы (НЧ) серебра благодаря поверхностному плазмонному резонансу, возникающему при фотовозбуждении, широко используются в спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) в качестве усилителей сигнала. В настоящей работе проведены исследования НЧ серебра боргидридного золя, нанесенные методом налива на матовую стеклянную поверхность. Боргидридный золь серебра синтезировали методом восстановления нитрата серебра тетраборгидридоборатом (боргидридом) натрия при температуре 2°С. Часть стеклянных образцов с нанесенными частицами НЧ серебра прокаливали в муфельной печи при 350°С. Радиус НЧ, измеренный на фотокорреляционной установке Photocor – Complex,

составлял 8 нм. Спектры поглощения показали наличие максимума на длине волны 420 нм, соответствующего плазмонному резонансу.

Спектры комбинационного рассеяния были получены на исследовательской установке Centaur U при возбуждении твердотельным лазером с диодной накачкой - DPSS ( $\lambda = 473$  нм, мощность излучения 50 мВт). КР-спектры (рис. 1) регистрировали с помощью детектора на основе ПЗС-матрицы с накоплением сигнала 20 с.

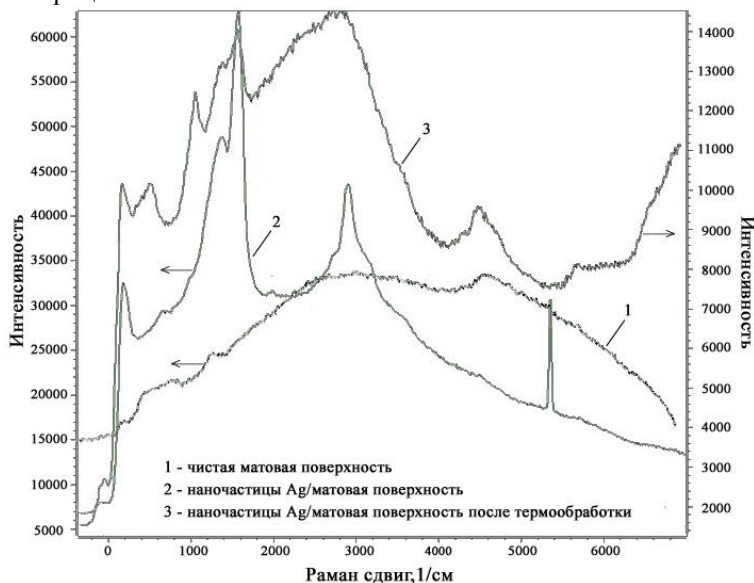


Рис. 1. КР-спектры наночастиц серебра боргидридного золя на матовой стеклянной поверхности до и после термической обработки при 350°C

Как видно из рисунка, высокотемпературная обработка приводит к возникновению в КР-спектре образца широких колебательных полос: 200-600  $\text{см}^{-1}$ , 1800-4000  $\text{см}^{-1}$ , 4200-5200  $\text{см}^{-1}$  [1, 2]. Их появление объясняется усилением колебаний групп, характерных для  $\text{SiO}_2$ , за счет частично растворенных в матовой поверхности стекла серебряных наночастиц [3].

Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 3.809.2014/К.

#### Список литературы

1. Smith J.E., Brodsky M.H., Crowder B.L., et. al. // Phys.Lett. 1971. V.26. P.642.
2. Ворсина И.А. и др. // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. Т.19.
3. Степанов А.Л., Валеев В.Ф., Нуждин В.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т.34. С.23.



А.В. ТРЕТЬЯЧЕНКО, В.А. КРИВЕНКОВ, М.А. ЗВАЙГЗНЕ,  
И.Л. МАРТЫНОВ, П.С. САМОХВАЛОВ, И.Р. НАБИЕВ,  
А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «НИЯУ МИФИ»*

## **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdSe/ZnS**

В рамках работы исследовалось влияние воздействия лазерного излучения наносекундной длительности, работающего в частотно-периодическом режиме с различными длинами волн излучения на оптические свойства квантовых точек (КТ) CdSe/ZnS в растворе толуола и в матрице полиметилметакрилата (ПММА). Обнаружено влияние длины волны облучения и начального квантового выхода (КВ) на изменение оптических свойств образцов. Сделан вывод о наличии двух конкурирующих процессов – фоторазгорания и фотозатухания. Было обнаружено, что эти процессы не зависят от интенсивности облучения в диапазоне  $10^5$ - $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Предложена модель, объясняющая наблюдаемые на эксперименте изменения оптических свойств квантовых точек.

A.V. TRETYACHENKO, V.A. KRIVENKOV, M.A. ZVAIGZNE,  
I.L. MARTYNOV, P.A. SAMOKHVALOV, I.R. NABIEV,  
A.A. CHISTYAKOV

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

## **EFFECT OF LASER IRRADIATION ON THE OPTICAL PROPERTIES OF CdSe/ZnS QUANTUM DOTS**

We studied the effect of laser irradiation on the colloidal solutions of CdSe/ZnS QDs in toluene and QDs in PMMA matrix. Also, the competitive processes such as photo-darkening and photo-brightening of different-sized CdSe/ZnS QDs in solution and in PMMA matrix were studied under various excitation wavelengths and intensities. We found that the processes of photo-brightening and photo-darkening do not depend on the excitation intensity, while the dose of the absorbed energy remains constant.

Благодаря уникальным оптическим свойствам полупроводниковые квантовые точки (КТ) широко применяются в различных областях. На практике, КТ часто подвергаются интенсивному лазерному воздействию, что может привести к изменению их оптических свойств [1,2]. Понимание процессов, происходящих в подобных наночастицах под действием лазерного излучения, является важным и актуальным вопросом.

В данной работе использовались КТ типа «ядро-оболочка» CdSe/ZnS различных размеров, покрытые слоем молекул гексадециламина, в виде раствора в толуоле, а также в матрице ПММА. Для исследования влияния энергии фотона на фотоиндуцированное изменение оптических свойств, было проведено облучение растворов КТ второй, третьей и четвертой гармониками наносекундного лазера YAG:Nd<sup>3+</sup>. Композиты КТ/ПММА облучались только второй и третьей гармониками, что обусловлено значительным поглощением матрицы ПММА в УФ области.

При облучении растворов КТ лазерным излучением с длиной волны 266 нм для образцов с изначально высоким КВ, наблюдался только процесс фотозатухания. Для образцов с изначально низким КВ(<10%) – при малых дозах облучения происходил рост КВ ансамбля, а при увеличении дозы значение КВ уменьшалось. При этом, на этапе фоторазгорания, кинетика люминесценции менялась незначительно. При облучении 355 нм для всех растворов КТ и композитов КТ/ПММА наблюдался рост КВ и отсутствие значительных изменений в кинетике люминесценции. Аналогичный результат наблюдался при облучении 532 нм для всех композитов КТ/ПММА и растворов КТ, кроме раствора КТ с максимумом люминесценции 570 нм, для которого изменений в данном случае не наблюдалось. Известно, что величина времени затухания люминесценции и изменение КВ сильно связаны. В рамках данного исследования для обоснования роста КВ растворов и композитов КТ при постоянной величине времени затухания было выдвинуто предположение, что в растворах и композитах КТ происходит процесс перевода части не излучающих КТ в излучающее состояние. Таким образом, КВ ансамбля будет расти, в то время, как усредненная по ансамблю кинетика люминесценции изменяться не будет. Процесс фотозатухания при этом, вероятно, связан с изменением КВ отдельных КТ.

Было установлено, что процессы фоторазгорания и фотозатухания не зависят от интенсивности в диапазоне  $10^5$ - $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> при неизменной дозе облучения. Полученные данные дают нам основание предположить однофотонный характер наблюдаемых фотопроцессов.

#### *Список литературы*

1. Krivenkov V.A., et. al. Resonance energy transfer in nano-bio hybrid structures can be modulated by UV laser irradiation // Laser Phys. Lett. 2014. V.11. No.11. P.115601.
2. Krivenkov V.A., et. al. Surface ligands affect photoinduced modulation of the quantum dots optical performance // Proceedings of SPIE. 2014. V.9126. P.91263N.

К.Х. АШИККАЛИЕВА<sup>1</sup>, Т.В. КОНОНЕНКО<sup>1,2</sup>, Е.А. ОБРАЗЦОВА<sup>1,2</sup>,  
Е.В. ЗАВЕДЕЕВ<sup>1,2</sup>, А.А. ХОМИЧ<sup>2</sup>, В.И. КОНОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ФОРМИРОВАНИЕ ГРАФИТОВЫХ НАНОСТРУКТУР В ОБЪЕМЕ АЛМАЗА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В настоящей работе представлены результаты исследования особенностей внутренней структуры графитизированной пластины, созданной в объеме алмаза посредством фемтосекундного лазерного излучения.

K.K. ASHIKKALIEVA<sup>1</sup>, T.V. KONONENKO<sup>1,2</sup>, E.A. OBRAZTSOVA<sup>1,2</sup>,  
E.V. ZAVEDEEV<sup>1,2</sup>, A.A. KHOMICH<sup>2</sup>, V.I. KONOV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **FORMATION OF GRAPHITIC NANOSTRUCTURES IN DIAMOND BULK UNDER FEMTOSECOND LASER PULSES**

In this paper, we report on the peculiarities of internal structure of the graphitized plate fabricated in diamond by femtosecond laser irradiation.

Лазерная обработка успешно используется для создания заглубленных проводящих микроструктур в объеме алмаза, базирующейся на фазовом переходе алмаза в графит [1]. Фокусирование лазерного излучения вглубь алмаза и транслирование фокуса сквозь толщу алмазного кристалла дает возможность создавать протяженные заглубленные микроструктуры. Проводящие микроструктуры в объеме алмаза имеют большое практическое значение, в частности, для создания алмазных детекторов ионизирующих излучений.

В работе исследована внутренняя структура графитизированной пластины, созданной в объеме алмаза посредством фемтосекундного лазерного излучения. Графитизированная пластина (ГП) прямоугольной формы ( $100 \times 115 \times 8$  мкм<sup>3</sup>) была создана в объеме CVD-алмаза посредством излучения Ti:sapphire-лазера ( $\tau=140$  фс,  $\lambda=800$  нм,  $f=1$  КГц), падающего нормально на грань (100) кристалла. Грань  $\langle 110 \rangle$  алмазного образца была механически отполирована с целью получить поперечное сечение ГП для

непосредственного изучения ее внутренней структуры. Поперечное сечение пластины было исследовано посредством спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Особенности распределения графитовой фазы в пределах поперечного сечения ГП изучались посредством сканирующей микроскопии сопротивления растекания (СМСР "INTEGRA Spectra", NT-MDT).

Согласно данным оптической микроскопии, лазерно-графитизированная пластина представляет собой непрозрачную структуру. Однако, полученные из поперечного сечения пластины спектры КР демонстрируют наличие интенсивного алмазного сигнала, что указывает на присутствие алмазной фазы внутри лазерно-модифицированной зоны. В спектрах КР наряду с алмазным пиком присутствовал графитовый сигнал от графита, но его интенсивность была неожиданно мала по сравнению с интенсивностью алмазного пика.

Посредством СЭМ выявлено, что сечение ГП содержит набор трещин: большая трещина, вытянутая вдоль центральной части поперечного сечения и набор квазипараллельных трещин, пересекающих центральную трещину практически перпендикулярно. Промежутки между трещинами заполнены лазерно-неповрежденным алмазом. Квазипараллельные трещины длиной до 2,5 мкм и шириной в 40-100 нм расположены на расстоянии около 300 нм друг от друга. Посредством СМСР было обнаружено, что пространственное распределение проводящих структур на СМСР-сканах полностью совпадает со "скелетом" трещин в СЭМ изображениях. Другими словами, сеть трещин является проводящей, тогда как области между ними демонстрируют то же значение поверхностного сопротивления, что и исходный алмаз.

Таким образом, что лазерно-модифицированный алмаз представляет собой смесь графитовой и алмазных фаз, поскольку алмаз лишь частично трансформировался в графит под действием лазерного излучения. При этом проводящая графитовая фаза локализуется вблизи трещин, тогда как промежутки между трещинами заполнены лазерно-неповрежденным алмазом. Можно сказать, что лазерно-модифицированная область представляет собой трехмерную сеть графитизированных наноструктур, окруженных исходным алмазом.

#### *Список литературы*

1. Kononenko T.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Rossukanyi N.M., Rukovishnikov A.I., Romano V. Three-dimensional laser writing in diamond bulk // *Diamond & Related Materials*. V.20. P.264-268. 2011.

А.С. БОЙКОВА<sup>1,2,3</sup>, К.Б. ИЛЬИНА<sup>1,2,3</sup>, М.А. МАРЧЕНКОВА<sup>2,3</sup>,  
Ю.А. ДЬЯКОВА<sup>2,3</sup>, Б.В. НАБАТОВ<sup>2</sup>, П.А. ПРОСЕКОВ<sup>2,3</sup>,  
А.Ю. СЕРЕГИН<sup>2,3</sup>, Е.Ю. ТЕРЕЩЕНКО<sup>2,3</sup>, М.В. КОВАЛЬЧУК<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ И РЕНТГЕНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИЕЙ**

В работе представлены возможности применения оптических и рентгеновских методов для исследования ультратонких органических пленок. В процессе работы были получены спектрофотометрические величины оптических плотностей пленок и рассчитаны значения эффективного числа монослоев. Исследования методом рентгеновской рефлектометрии позволили рассчитать величины плотностей, толщин и шероховатостей пленок.

A.S. BOIKOVA<sup>1,2,3</sup>, K.B. ILINA<sup>1,2,3</sup>, M.A. MARCHENKOVA<sup>2,3</sup>,  
Yu.A. DYAKOVA<sup>2,3</sup>, B.V. NABATOV<sup>2</sup>, P.A. PROSEKOV<sup>2,3</sup>,  
A.Yu. SEREGYN<sup>2,3</sup>, E.Yu. TERESHENKO<sup>2,3</sup>, M.V. KOVALCHUK<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>Shubnikov Institute of Crystallography of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow

## **INVESTIGATION OF ORGANIC THIN FILMS BY OPTICAL AND X-RAY METHODS**

Investigation of X-ray and the optic methods application possibilities for parametrization of a ultrathin layers with different thickness on substrates is presented. Spectrophotometry proved of the optical density variation on the sample surface. X-ray reflectivity study showed the presence of the lateral ordering defects in the mono- and trilayers sample areas, and periodic structure formation, starting from the 5-layers area

Рост интереса к исследованию органо-неорганических гибридных материалов вызван прежде всего перспективой их использования в молекулярной электронике, фотовольтаике, химических и биохимических сенсорах. Одним из методов контролируемого создания гибридных планарных систем является технология Ленгмюра-Блоджетт, позволяющая управлять структурой и химическим составом получаемых

пленок и создавать мультислойные структуры с необходимыми физическими свойствами [1]. Исследование структуры таких систем может помочь выявить связь между их функциональными свойствами и условиями получения [2].

Целью данной работы было исследование тонких органических пленок модельного соединения стеарата свинца неразрушающими методами спектрофотометрии и рентгеновской рефлектометрии, а также изучение эффективности совместного использования данных методик.

В ходе работы были изготовлены образцы, представляющие из себя органические пленки стеарата свинца толщиной 1,3,5,7 и 9 монослоев, перенесенные методом Ленгмюра-Блоджетт на твердые подложки. Был рассчитан коэффициент переноса, отражающий качество изготовления образцов.

В процессе работы были получены спектрофотометрические величины оптических плотностей пленок и рассчитаны значения эффективного числа монослоев. Исследования методом рентгеновской рефлектометрии позволили рассчитать величины плотностей, толщин и шероховатостей пленок. Полученные в ходе работы значения эффективного числа монослоев и сравнение их значений, рассчитанных с помощью данных методик, продемонстрировали взаимодополняемость предложенных методов исследования образцов.

*Список литературы*

1. Ковальчук М.В., Клечковская В.В., Фейгин Л.А. // Природа. 2003. Т.72. №12. С.45-48.
2. Марченкова М.А., Дьякова Ю.А., Серегин А.Ю., Орехов А.С., Клечковская В.В., Имамova Л.Р., Терещенко Е.Ю. // Поверхность. 2013. №11. С.1-6.

Ю.О. КУЗНЕЦОВА, В.И. МАКАРОВ<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

*<sup>1</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

**ПРИМЕНЕНИЕ НАНОФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА  
(НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ)  
ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ И ПРОФИЛАКТИКИ  
ВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ**

Оценивалась возможность применения в клинической практике нового вида фотосенсибилизатора – наночастиц фталоцианина алюминия (НЧ-АlPhc) для диагностики, профилактики и терапии в стоматологии и травматологии. Представлены экспериментальные данные исследований взаимодействия НЧ-АlPhc с эмалью зуба и с биологической тканью сустава при артрозе.

Ju.O. KUZNETSOVA, V.I. MAKAROV<sup>1</sup>

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

*<sup>1</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

**APPLICATION OF NANOPHOTOSENSITISERS  
(ALUMINUM PHTHALOCYANINE NANOPARTICLES)  
FOR EARLY DIAGNOSIS AND PREVENTION  
OF INFLAMMATORY DISEASES**

This paper deals with a possibility of application of a new type of photosensitisers – Aluminum Phtalocyanine nanoparticles (NP-AlPhc) in clinical practice for diagnosis, prevention and therapy of inflammatory diseases in dentistry and traumatology. Experimental studies of interaction of NP-AlPhc with tooth enamel and with biological joint tissue at arthrosis are presented.

В коллоидном растворе молекулярные нанокристаллы фталоцианина алюминия не флуоресцируют и не имеют фотодинамического потенциала, но под воздействием специфичной среды начинают проявлять свойства свободных молекул АlPhc. Фотолуминесценция этих частиц начинает проявляться только при взаимодействии с патологически измененной биотканью, патогенной микрофлорой и иммунокомпетентными клетками (макрофагами). В настоящей работе рассмотрена возможность применения НЧ-АlPhc в клинической практике: в стоматологии для обнаружения микроповреждений эмали, содержащей карисогенные бактерии, и в травматологии для флуоресцентной диагностики и

фотодинамической терапии артрозов суставов. Для выявления характера взаимодействия НЧ-АІРhс с эмалью зуба был приготовлен образец, состоящий из порошка эмали и НЧ-АІРhс. Для выявления разницы в интенсивности и скорости возникновения флуоресцентных свойств НЧ-АІРhс в здоровом суставе и суставе с артрозом, в оба коленных сустава (с моделью гонартроза и без) в суставную сумку вводилось 1 мл коллоида НЧ-АІРhс с концентрацией 50 мкг/мл. Измерение спектров флуоресценции НЧ-АІРhс проводилось при помощи волоконно-оптического спектрометра «ЛЭСА-01-БИОСПЕК». Возбуждение флуоресценции производилось при помощи He-Ne лазера (632,8 нм). На рис. 1 представлены спектры флуоресценции НЧ-АІРhс, смешанных с порошком эмали и человеческой слюной. Из рисунка видно, что флуоресценция порошка эмали (с водой и без) в 7 раз ниже флуоресценции порошка, содержащего НЧ-АІРhс. Из рис. 2 видно, что интенсивность флуоресценции НЧ-АІРhс в патологически измененном суставе в 5-7 раз выше, чем в здоровом суставе. Данный результат позволяет утверждать, что возникновение интенсивной флуоресценции НЧ-АІРhс происходит только в ткани с воспалительными процессами.

В ходе проведения эксперимента было установлено, что НЧ-АІРhс флуоресцируют в порошке эмали и при добавлении слюны, содержащей микрофлору полости рта. Потенциально они могут быть использованы для диагностики различных заболеваний полости рта. Интенсивность флуоресценции АІРhс суставе с артрозом увеличивается, что может быть использовано для диагностики, профилактики и терапии воспалительных заболеваний.

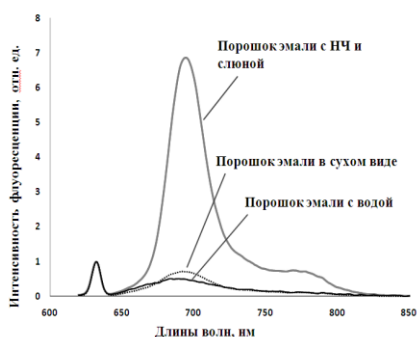


Рис. 1. Спектры флуоресценции НЧ-АІРhс, смешанных с порошком эмали и человеческой слюной

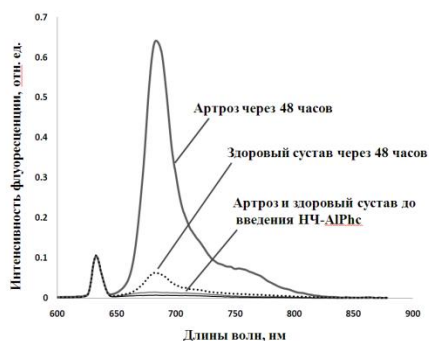


Рис. 2. Спектры флуоресценции НЧ-АІРhс, измеренные в здоровом суставе и суставе с артрозом



Ф.Г. БЫСТРОВ<sup>1</sup>, В.И. МАКАРОВ<sup>2</sup>, В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ В ПИКО- И НАНОСЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ pH И ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ИММУНОКОМПЕТЕНТНЫМИ КЛЕТКАМИ**

Работа посвящена исследованию фотолюминесценции коллоидных растворов наночастиц фталоцианина алюминия при различных pH и при взаимодействии с иммунокомпетентными клетками. При pH=1,5 было зафиксировано наличие двух времен жизни флуоресценции: 5000 пс и 1300 пс. При взаимодействии с макрофагами анализ показал наличие трех компонент: 3000 пс, 260 пс и 20 пс. Предложена модель перехода поверхностных молекул фталоцианина алюминия.

F.G. BYSTROV<sup>1</sup>, V.I. MAKAROV<sup>2</sup>, V.B. LOSCHENOV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **INVESTIGATION OF THE ALUMINIUM PHTHALOCYANINE NANOPARTICLES PHOTOLUMINESCENCE KINETICS IN PICO- AND NANOSECOND TIME RANGE, DEPENDING ON THE pH AND IN THE INTERACTION WITH IMMUNE CELLS**

This work is dedicated to the study of the photoluminescence of aluminum phthalocyanine nanoparticles in colloidal solutions at different pH and in the interaction with immune cells. At pH=1,5 the presence of two fluorescence lifetimes was recorded: 5000 ps and 1300 ps. Analysis of the fluorescence intensity decay of Al phthalocyanine nanoparticles which interacting with macrophages indicates the presence of three lifetimes: 3000 ps, 260 ps and 20 ps. A model of surface molecules transitions was proposed.

В [1] исследовалось применение наночастиц фталоцианина алюминия (НЧ-АlPc) для оценки риска отторжения аутотрансплантатов кожи. Было установлено, что при аппликации коллоидного раствора НЧ-АlPc на аутотрансплантаты происходит увеличение интенсивности флуоресценции при воспалительном отторжении. В [2] оценивалась

возможность применения НЧ-АІРс для ФД и ФДТ заболеваний суставов. После лазерного воздействия в области исследования наблюдался отчетливый фотобличинг, который отсутствует при использовании молекулярной формы.

Целью этой работы являлось изучение кинетики фотолюминесценции коллоидных растворов НЧ-АІРс при взаимодействии с макрофагами и при различных рН. Для этого использовалась система регистрации, основанная на пикосекундной стрик камере Hamamatsu, с временным разрешением 15 пс, и лазер с длительностью импульса 67 пс и длиной волны 637 нм. В качестве образцов было подготовлено несколько коллоидов НЧ-АІРс при различных рН, а также несколько образцов с наночастицами в макрофагах в присутствии растворителя и без него. При рН = 7 флуоресценция полностью отсутствовала. При рН = 10 было зарегистрировано появление флуоресценции с максимумом на 680 нм. Анализ кинетики деградации флуоресценции показал наличие одной компоненты времени жизни флуоресценции с длительностью 5000 пс, что соответствует молекулярной форме фталоцианина алюминия в растворе. При рН = 11 было зарегистрировано появления двух времен жизни флуоресценции: 3500 пс и 350 пс. При рН = 3 было зарегистрировано только одно время жизни флуоресценции с длительностью 5000 пс, а при рН = 1,5 было получено два времени жизни: 4500 пс и 1500 пс. Для образцов с макрофагами анализ кинетики загухания флуоресценции НЧ-АІРс без растворителя показал наличие двух времен жизни: 4500 пс и 40 пс. В присутствии растворителя было зарегистрировано три времени жизни: 3000 пс, 260 пс и 20 пс. Основываясь на том, что флуоресценция наночастиц фталоцианина алюминия подвержена фотобличингу, что не характерно для молекулярной формы фталоцианина алюминия, можно сделать предположение, что появление флуоресценции от НЧ-АІРс в патологически измененной ткани происходит не только за счет обычного растворения, но и за счет перехода поверхностных молекул в другое состояние. Подтверждением этому служит возникновение нескольких компонент времен жизни флуоресценции, каждое из которых характерно для конкретного состояния молекулы на поверхности.

#### *Список литературы*

1. Vasilchenko S.Yu., Volkova A.I., Ryabova A.V., et. al. Application of aluminum phthalocyanine nanoparticles for fluorescent diagnostics in dentistry and skin autotransplantation // J. Biophoton. 2010. V.3. No.5–6. P.336–346.
2. Макаров В.И., Бородкин А.В., Лощёнов М.В. и др. Флуоресцентные методы контроля фотодинамической терапии артрозов с применением наночастиц фталоцианина алюминия (экспериментальное исследование) // Российский химический журнал. 2016.

К.Б. ИЛЬИНА<sup>1,2,3</sup>, М.А. МАРЧЕНКОВА<sup>2,3</sup>, Ю.А. ДЬЯКОВА<sup>2,3</sup>,  
В.В. ВОЛКОВ<sup>2,3</sup>, Е.Ю. ТЕРЕЩЕНКО<sup>2,3</sup>, А.Е. БЛАГОВ<sup>2,3</sup>,  
Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ<sup>2,3</sup>, М.В. КОВАЛЬЧУК<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

## ИССЛЕДОВАНИЯ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ БЕЛКА ЛИЗОЦИМА МЕТОДОМ МАЛОУГЛОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ

В этой работе мы исследовали изменение состояния молекул лизоцима в растворе на начальной стадии кристаллизации методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Показано, что при добавлении к раствору белка осадителя образуются олигомеры которые, вероятно, являются строительными элементами будущего кристалла.

K.B. ILINA<sup>1,2,3</sup>, M.A. MARCHENKOVA<sup>2,3</sup>, Yu.A. D'YAKOVA<sup>2,3</sup>,  
V.V. VOLKOV<sup>2,3</sup>, E. Yu. TERESHCHENKO<sup>2,3</sup>, A.E. BLAGOV<sup>2,3</sup>,  
Yu.V. PISAREVSKII<sup>2,3</sup>, M.V. KOVALCHUK<sup>2,3</sup>

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

<sup>2</sup>Shubnikov Institute of Crystallography of the RAS, Moscow

<sup>3</sup>National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow

## INVESTIGATION OF THE INITIAL CRYSTALLIZATION LYSOZYME BY SMALL-ANGLE X-RAY SCATTERING METHOD

In this work we investigated a change in the state of lysozyme molecules in a solution of lysozyme with precipitant at the initial crystallization stage by small-angle X-ray scattering method. It was shown that oligomers form in the protein solution, when we add the precipitant. It is probably the major units for future crystal.

Рост белковых кристаллов – сложный физико-химический процесс, зависящий от множества различных факторов pH, температуры, концентрации, состава растворов [1-3]. В настоящее время кристаллизация белков осуществляется путем простого перебора условий, что делает процесс получения кристаллов достаточно трудоемким и непредсказуемым. При этом сами механизмы кристаллизации белков мало изучены, а системы рационального подбора условий кристаллизации не

существует. Мы предполагаем, что в росте белкового кристалла могут принимать участие олигомеры, образующиеся в растворе в условиях кристаллизации.

Для экспериментального подтверждения нашего предположения раствор белка лизоцима на начальной стадии кристаллизации исследовали методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР). МУРР является одним из наиболее эффективных методов исследования поведения белковых молекул в растворе [4]. Были проведены измерения угловых зависимостей интенсивности рассеяния рентгеновских лучей в области малых углов от растворов белка и белка с осадителем в условиях роста кристаллов лизоцима тетрагональной сингонии. По полученным кривым МУРР с помощью программы POLYMIX [5] были рассчитаны распределения по размерам частиц, наблюдаемых в растворах. Показано, что в присутствии осадителя в растворе появились частицы с удвоенным радиусом, что может соответствовать октамерным образованиям. Для более подробной и достоверной обработки экспериментальных данных в программе Pymol [6] смоделированы возможные олигомеры – димер, тетрамер и октамер. С помощью программы CRY SOL [7] рассчитаны угловые зависимости рентгеновского рассеяния для каждого олигомера, а с помощью программы OLIGOMER [5, 8] определен состав кристаллизационного раствора. Согласно полученным данным в растворе лизоцима в условиях кристаллизации тетрагональной формы помимо мономеров данного белка образуются примерно в равных концентрациях димеры и октамеры. Которые, по-видимому, и являются строительными элементами будущего кристалла.

*Список литературы*

1. Ries-Kautt M.M., Ducruix A.F. // J. Biol. Chem. 1989. V.264. No.2. P.745.
2. Kam Z., Shore H.B., Feher G. // J. Mol. Biol. 1978. V.123. No.4. P.539.
3. Pusey M.L., Snyder R.S. // J. Biol. Chem. 1986. V.261. No.14. P.6524.
4. Свєргун Д.И., Фейгин Л.А. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М.: Наука, 1986.
5. Konarev P.V., Petoukhov M.V., Volkov V.V., et al. // J. Appl. Cryst. 2006. V.39. No.2. P.277.
6. Schrodinger, LLC, ThePyMOL Molecular Graphics System, Version 1.3r1. In ed.; 2010.
7. Svergun D., Barberato C., Koch M.H. // J. Appl. Cryst. 1995. V.28. No.6. P.768.
8. <http://www.embl-hamburg.de/biosaxs/oligomer.html>.

П.Ю. РОГОВ, В.Г. БЕСПАЛОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ВОЗДЕЙСТВИЕ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ГЛАЗА И КОЖНЫЕ ПОКРОВЫ: МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ**

Представлены математические модели линейных и нелинейных процессов, возникающих при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на кожные покровы и модельную среду человеческого глаза. Моделирование проведено методами численного решения нелинейного спектрального уравнения, описывающего динамику двумерного ТЕ-поляризованного излучения в однородной изотропной среде с кубичной безынерционной нелинейностью. Для воздействия на мутные среды, описан механизм воздействия и получено численное решение системы уравнений, описывающих динамику электронной и атомной подсистемы. Модели учитывают возникновение нелинейных эффектов.

P.Yu. ROGOV, V.G. BESPALOV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **IMPACT OFFEMTOSECONDLASERPULSESON EYE AND SKIN: MATHEMATICAL MODELS**

In this paper a mathematical models of linear and nonlinear processes occurring under the influence of femtosecond laser radiation on the eye skin were introduced. The propagation modeling was performed by numerical simulation of the equation describing the dynamics of a two-dimensional TE-polarized radiation in a homogeneous isotropic medium with cubic nonlinearity fast-response. For effects on turbid media, the mechanism of action and analysis was described, and the numerical solution of a system of equations describing the dynamics of the electron and phonon subsystems was received. The models take into account the process of dispersion broadening of the pulse time, the effect of self-focusing, two- and three-photon absorption, multiphoton and impact ionization, multiphoton absorption, optical breakdown at high energy density.

Фемтосекундные лазерные системы в настоящий момент широко используются в технических приложениях и медицинской технике [1, 2]. Но в настоящее время в Российской Федерации на настоящий момент не существует стандартов по безопасным уровням энергии фемтосекундного лазерного излучения [3]. Существенное отличие механизмов воздействия, интенсивного фемтосекундного лазерного излучения от излучения с большей длительностью обусловлено возникновением нелинейных

эффектов. Вследствие высокой плотности мощности возникает ряд нелинейных эффектов: самофокусировка, двух- и трехфотонное поглощение, многофотонная и ударная ионизация, в связи малой длительностью – дисперсионное расплывание импульса во времени и, при высокой плотности энергии – оптический пробой [4]. Мощное фемтосекундное излучение может нести существенную опасность для зрения, кожных покровов и внутренних органов человека.

В биологических тканях основным компонентом является вода, которая присутствует в связанном с белком и несвязанном виде. В моделях рассматривается механизм ионизации молекул воды и передача энергии фоновой подсистеме молекул белка. Представлена динамика процесса дисперсионного уширения и самофокусировки фемтосекундного излучения вблизи глазного дна. Выяснено, что основным механизмом повреждения при использовании лазера на титан-сапфире (800 нм) является фотоионизация, так как длительность импульса излучения вблизи глазного дна имеет значение порядка 100 фс, даже при длительности падающего импульса 10 фс. При значении плотности мощности на входе в глаз больше  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> вблизи глазного дна будет возникать явление самофокусировки в непосредственной близости от сетчатки, что, в сравнении с непрерывным излучением, может приводить к серьезным повреждениям при меньшей интенсивности, что соответствует экспериментальным данным, приведенным в стандарте лазерной безопасности США [5]. Представлена математическая модель распространения фемтосекундного излучения при попадании на кожный покров. С помощью моделирования методом Монте-Карло [6] определена зависимость интенсивности излучения от глубины проникновения. С помощью аналитического решения системы уравнений, описывающих электронный баланс между электронной и атомной подсистемой, рассмотрен механизм воздействия фемтосекундного излучения на кожу и произведена оценка протекающих при этом временных процессов.

Результаты данной работы получены в рамках государственного заказа №3.1675.2014/К Министерства образования и науки РФ.

#### *Список литературы*

1. Ахманов С.А. и др. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М.:Наука, 1988.
2. Rulliere C. Femtosecond laser pulses. Springer, Ed. Rulliere C. 2005.
3. ГОСТ Р 50723-94: Лазерная безопасность. М.:Издательство стандартов, 1995.
4. Sati P., Verma U., Tripathi V.K. // Physics of Plasmas. 2014. V.21. No.11. P.112110.
5. Standard A. Z136. 1–2007. American National Standard for the Safe Use of Lasers. 2007.
6. Пушкарёва А.Е. Методы математического моделирования в оптике биоткани: учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2008.

Ю.С. МАКЛЫГИНА, А.В. БОРОДКИН

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

## **РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ НЕЙРОПОРТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ПРОФИЛАКТИКИ РЕЦИДИВОВ ГЛИОБЛАСТОМ**

Данное исследование направлено на разработку волоконно-оптических нейропортов для диагностики и профилактики глиомы головного мозга с применением методик флуоресцентной диагностики и фотодинамической терапии. Подобное комбинированное воздействие возможно за счет оптоволоконной внутренней части нейропорта, которая выполняет роль структуры, способствующей и задающей направление распространению патологических структурно-функциональных единиц нервной системы [1], а также роль порта для доставки препарата и лазерного излучения с целью осуществления мониторинга процессов, проведения регулярной флуоресцентной диагностики и своевременной фотодинамической терапии зондируемой области.

Ju.S. MACLYGINA, A.V. BORODKIN

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

## **THE DEVELOPMENT OF FIBER-OPTIC SCUFFOLDS FOR THE GLIOBLASTOMA DIAGNOSIS AND PREVENTION**

The main goal of the research is creation of the unique fiber-optical multipurpose system created on the basis of porous optical fibers. The fiber-optical scuffolds would perform the role of the structure which is promoting and setting the of glial cells growth. Also this system acts as a port for delivery of a photosensitizers and laser radiation for the purpose of cellular processes monitoring. So developed system allows to carry out a regular fluorescent diagnostics and timely photodynamic therapy of the probed area.

В рамках данного исследования с применением лазерной сканирующей конфокальной микроскопии были визуализированы процессы роста клеток злокачественной глиомы  $C_6$  вдоль оптических волокон. Данные исследования *in vitro* показали, что клетки злокачественной глиомы формируют вокруг оптических волокон агломераты, а также образуя крепления, направленно пролиферируют вдоль волоконных структур. Полученные результаты дают основания полагать, что в условиях *in vivo* может быть реализован подход направленного роста клеток злокачественной глиомы из внутричерепной области вглубь разрабатываемого нейропорта с последующим

фотодинамическим воздействием, приводящим к гибели клеток. В этой связи в ходе исследования были разработаны и апробированы на экспериментальных животных конструкции портов различной формы, размеров и пр. Успешная апробация (отсутствие абсцессов и отторжения портов) позволила установить оптимальные свойства и внешние размеры мозговых портов. Разработанные конструкции закреплялись подкожно на черепной коробке экспериментальных животных и служили в качестве порта для локальной доставки фотосенсибилизатора и лазерного излучения. Таким образом, в результате фотодинамической терапии (на примере перспективного фотосенсибилизатора «Фталосенс»), возбуждение излучением с  $\lambda=675$  нм) был достигнут высокий терапевтический эффект и обеспечен постоянный доступ в ложе опухоли для мониторинга состояния (рис. 1). Таким образом, разработанная оптоволоконная система позволила осуществлять непрерывный мониторинг процессов, происходящих в ложе первичной опухоли, снижая объем первичной опухоли. В перспективе планируется использование ИК-фотосенсибилизаторов в целях достижения высокого терапевтического эффекта воздействия на патологические ткани мозга глубокой локализации.

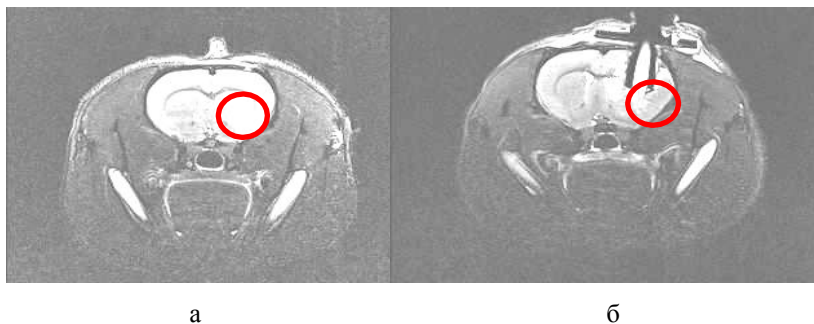


Рис. 1. МРТ-снимок головного мозга крысы (вид сбоку), до терапии, отмечена растущая опухоль (а), МРТ-снимок головного мозга крысы с встроенным портом, после ФДТ с Фталосенсом,  $\lambda=675$  нм, отмечено место локализации первичной опухоли. (б)

*Список литературы*

1. Jain A, Betancur M, et. al. Guiding intracortical brain tumour cells to an extracortical cytotoxic hydrogel using aligned polymeric nanofibers // *Nat Mater.* 2014. V.13(3). P.308.



М.А. БРУК, Е.Н. ЖИХАРЕВ, А.Е. РОГОЖИН<sup>1</sup>, Д.Р. СТРЕЛЬЦОВ<sup>2</sup>,  
В.А. КАЛЬНОВ<sup>1</sup>, С.Н. АВЕРКИН<sup>1</sup>, А.В. СПИРИН

*Физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Москва*

<sup>1</sup>*Физико-технологический институт РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,  
Москва*

## **ФОРМИРОВАНИЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУР СО СКРУГЛЕННЫМ ПРОФИЛЕМ СЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВОГО ЭЛЕКТРОННО- ЛИТОГРАФИЧЕСКОГО ПРИНЦИПА**

Показано, что для прямого получения микро- и наноструктур с хорошо скругленным профилем сечения успешно может быть использован новый «сухой» метод электронной литографии (ЭЛ), в котором рельеф в резисте формируется непосредственно в процессе экспонирования. Чувствительность ПММА резиста в этом методе в 100–1000 раз выше, чем в стандартной «мокрой» ЭЛ, что открывает потенциальную возможность создания более дешевой и производительной технологии, в частности, в области оптоэлектроники и 3D-структурирования.

M.A. BRUK, E.N. ZHIKHAREV, A.E. ROGOZHIN<sup>1</sup>,  
D.R. STRELTSOV<sup>2</sup>, V.A. KALNOV<sup>1</sup>, S.N. AVERKIN<sup>1</sup>, A.V. SPIRIN

*L.Ya. Karpov INSTITUTE of Physical Chemistry, Moscow*

<sup>1</sup>*Physics and Technology Institute of the RAS, Moscow*

<sup>2</sup>*Enikolopov Institute of Synthetic Polymer Materials of RAS, Moscow*

## **FORMATION OF MICRO- AND NANOSTRUCTURES WITH WELL-ROUNDED PROFILE BY NEW E-BEAM LITHOGRAPHY PRINCIPLE**

It was shown that for direct formation of micro- and nanostructures with well-rounded profile the new method of dry electron-beam resist etching could be used. In this method relief in resist is formed direct in exposure process. Sensitivity of PMMA in this process is about 100–1000 times higher than that in the standard “wet” e-beam lithography. Potentially high throughput and low-cost lithography process can be developed on the ground of the new method. This opens up new opportunities in some areas of technology for example in optoelectronics and 3D structuring.

Прямое формирование микро- и наноструктур с хорошо скругленным профилем сечения представляет определенные трудности. Обычно вместо

этого получают ступенчатый профиль, что значительно усложняет процесс. Для решения этой проблемы авторы предлагают использовать «сухой» метод формирования изображения непосредственно в процессе экспонирования резиста электронным лучом (метод DEBER), предложенного М.А. Бруком и др. [1]. Метод основан на цепной химической реакции деполимеризации, которая протекает при воздействии электронного луча на полимерный резист, нагретый выше температуры стеклования. Образующиеся летучие продукты (мономер) удаляются в процессе откачки. В данной работе показано, что метод DEBER позволяет формировать в резисте скругленные рельефы различной формы (см. рис. 1) непосредственно в одностадийном процессе экспонирования. При этом необходимы весьма малые дозы экспонирования – для ПММА-резиста они в 100–1000 раз меньше, чем в традиционной «мокрой» ЭЛ. Это позволяет значительно увеличить производительность и снизить стоимость ЭЛ процесса и открывает перспективу использования метода DEBER в некоторых областях техники, например, в оптоэлектронике и 3D-структурировании.

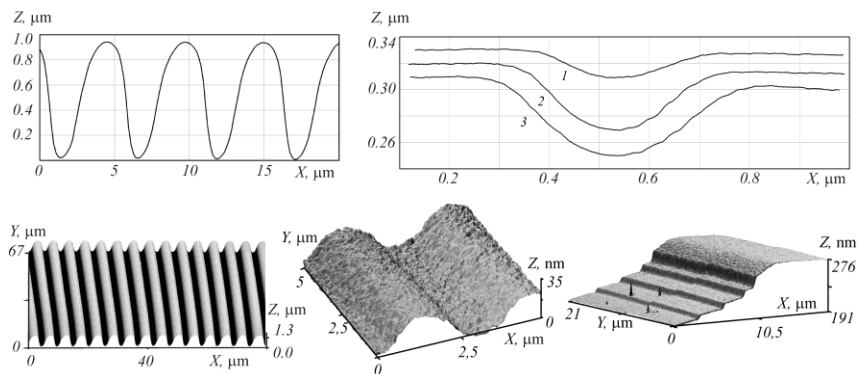


Рис. 1. Некоторые структуры в ПММА, полученные методом DEBER

#### Список литературы

1. Bruk M.A., Zhikharev E.N., Streltsov D.R., Kalnov V.A., Spirin A.V. The new dry method of mask (relief) formation by direct electron-beam etching of resist // Microelectronic Engineering. 2013. V.112. P.1-4.

Р.А. РАХИМОВ, Е.В. ОСИПОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО,  
И.Л. МАРТЫНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ЗАВИСИМОСТЬ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ РУГЕЙТ-ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ**

Известно, что фотонные кристаллы на базе пористого кремния, широко используются в качестве элементов оптических сенсоров. При этом наибольший интерес представляют структуры, обладающие резонансными свойствами, например, узкой полосой отражения, что обеспечивает высокую чувствительность устройства. В данной работе проведена оптимизация параметров электрохимического травления кремния с целью получения ругейт-фильтров с шириной полосы отражения в видимом диапазоне менее 50 нм и коэффициентом отражения более 90%.

R.A. RAKHIMOV, E.V. OSIPOV, D.S. DOVZHENKO,  
I.L. MARTYNOV, A.A. CHISTYAKOV

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

## **DEPENDENCE OF THE REFLECTANCE SPECTRA OF RUGATE-FILTERS BASED ON POROUS SILICON ON THE PARAMETERS OF ELECTRO-CHEMICAL ETCHING**

It is known that porous silicon photonic crystals are widely used as a component of optical sensors. Some of the most interests are structures with resonance properties, narrow-band reflection particularly, that provides high sensitivity of the device. Rugate-filter could be effectively used for this purpose. In this study, we have performed an optimization of electro-chemical etching of silicon in order to obtain rugate-filters with a bandwidth of reflection in the visible range of less than 50 nm and a reflectance of 90%.

В настоящее время большой интерес представляют оптические сенсоры, преимуществами которых являются быстрый отклик на изменение внешних условий и высокая чувствительность. В качестве элементов оптических датчиков можно использовать ругейт-фильтр [1] на основе пористого кремния (ПК), обладающий высокой удельной площадью поверхности [2] и развитой системой пор. Такие структуры, как и другие фотонные кристаллы получают методом электрохимического

травления кремния в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты [3]. Ключевые оптические характеристики получаемых образцов, зависят от параметров травления, таких как плотность тока, профиль тока и т.д. Эти зависимости имеют нелинейный характер, поэтому необходим экспериментальный подбор параметров травления с целью получения образцов с узкой полосой и высоким коэффициентом отражения.

В данной работе использовался монокристаллический кремний КДБ, с удельным сопротивлением 0,003-0,005 Ом·см и ориентацией поверхности (100). Электрохимическое травление кремния проводилось на установке, выполненной из фторопласта. Electroдами служили – платиновая пластина (катод) и образец монокристаллического кремния на алюминиевой пластине (анод). Процесс электрохимического травления проходил в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты ( $\text{HF}:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} - 1:2$ ). В качестве источника тока использовался прецизионный прибор KEITHLEY 2600A, с помощью которого задавался синусоидальный профиль тока. На первом этапе была исследована зависимость оптических свойств ругейт-фильтров от количества слоев (периодов) гармонического изменения показателя преломления. Характерная толщина отдельного слоя при этом составляла 170нм. Максимум спектра отражения ругейт-фильтров приходился на диапазон 500-570нм. При повышении количества слоев с 50 до 100 наблюдалось существенное улучшение формы профиля отражения и уменьшение амплитуды вторичных пиков более чем на 25 %. Далее было проведено исследование влияния плавного изменения плотности тока в начале и конце травления на спектры отражения. Таким образом, была получена меньшая разность показателя преломления на границе пористый кремний / воздух, что привело к дополнительному уменьшению интенсивности вторичных пиков в 2 раза, что соответствует литературным данным [4]. Так же было исследована зависимость ширины полосы отражения ругейт-фильтра от амплитуды тока. При уменьшении амплитуды модуляции тока в 1,5 раза наблюдается уменьшение ширины полосы на 30%, что можно объяснить уменьшением диапазона изменения показателя преломления структуры. В результате всех этапов оптимизации удалось создать ругейт-фильтр из пористого кремния с шириной полосы отражения в видимом диапазоне менее 50 нм и коэффициентом отражения более 90%.

*Список литературы*

1. Bovard B.G. // Appl. Opt. 1993. V. 32. No.3. P.5427–5442.
2. Halimaoui A. // Surface Science. 1994. V.306. P.550–554.
3. Lehmann V., Gösele U. // Appl. Phys. Lett. 1991. V.58. No.8. P.856-858.
4. King B.H., Sailor M.J. // J. Nanophotonics. 2011. V.5. No.1.P.051510.

Е.А. САВЕЛЬЕВ, К.М. ГОЛАНТ

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

**ВЛИЯНИЕ ПРОПЛАВЛЕНИЯ НА ОДНОРОДНОСТЬ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ  $\text{Yb}^{3+}$  И ОБРАЗОВАНИЕ  
КЛАСТЕРОВ В КВАРЦЕВОМ СТЕКЛЕ С ФОСФОРОМ,  
СИНТЕЗИРОВАННОМ МЕТОДОМ SPCVD**

Исследованы спектры потерь канальных световодов с активированной иттербием сердцевиной на основе аморфного диоксида кремния с примесью фосфора. Световедущие структуры были синтезированы методом SPCVD. Показано, что проплавление осажденной структуры приводит к увеличению размеров кластерных включений в стекло в виде кристаллов  $\text{YbPO}_4$ .

E.A. SAVEL'EV, K.M. GOLANT

*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS, Moscow*

**THE INFLUENCE OF FUSING ON THE UNIFORMITY  
OF THE DISTRIBUTION OF  $\text{Yb}^{3+}$  IONS  
AND THE FORMATION OF CLUSTERS ON SILICA  
WITH PHOSPHORUS ADMIXTURE SYNTHESIZED BY SPCVD**

The loss spectra of slab lightguides with Yb-activated P-doped silica cores are studied. Lightguiding structures were synthesized by surface-plasma chemical vapor deposition (SPCVD). The fusing of the deposited structure leads to an increase in the size of clusters constituting  $\text{YbPO}_4$  crystals.

Однородность распределения активатора в матрице материала-основы имеет большое значение для характеристик твердотельного лазера. Благодаря возможности изготовления на основе кварцевого стекла оптических волокон исследование аморфного диоксида кремния в качестве матрицы для редкоземельных оксидов представляет значительный интерес. Среди редкоземельных лазерных активаторов особое место занимает иттербий ( $\text{Yb}$ ), на основе которого уже изготовленные волоконные лазеры с мощностью  $\sim 10$  кВт для одномодового варианта [1]. В то же время для создания еще более мощных волоконных и волноводных лазеров желательно дальнейшее увеличение концентрации иттербия в стекле.

Технология газофазного синтеза кварцевого стекла в плазме поверхностного СВЧ разряда пониженного давления, SPCVD [2], позволяет получить стабильный, однородно легированный аморфный диоксид кремния, минуя стадию плавления. Для проведения экспериментов нами были изготовлены специальные образцы в виде канальных световодов. С этой целью методом SPCVD на внутренней поверхности опорной трубки из кварцевого стекла, температура которой во время процесса поддерживалась в районе  $1150^{\circ}\text{C}$ , были синтезированы двух- или трехслойные структуры на основе аморфного диоксида кремния. Из нее, в дальнейшем, с помощью продольного выпиливания были изготовлены образцы размером  $0.2 \times 2 \times 20$  мм. Было изучено две группы образцов: до и после прогрева опорной трубки вместе с осажденной структурой в пламени продольно движущейся водород-кислородной горелки при температуре поверхности порядка  $1500-1700^{\circ}\text{C}$ .

С помощью рентгеновского микроанализа было установлено, что отношение концентраций Yb и P в среднем по образцу и внутри кластера близко к единице. Это позволяет предположить, что кластер состоит из вещества близкого по составу к  $\text{YbPO}_4$ .

Для оценки размеров кластеров исследованы спектры потерь на рассеяние канальных световодов в области длин волн от 320 до 750 нм, которые аппроксимировались в приближении Рэлея. Используя результаты этой аппроксимации и данные по химическому анализу было получено, что размер рассеивающего центра в результате проплавления возрастает примерно в 13 раз.

Используя электронограмму участка с кластерами, мы рассчитали угловое положение максимумов дифракции рассеянных электронов, которые в пределах погрешности совпали с основными пиками рентгеновской дифракции кристалла  $\text{YbPO}_4$ .

В результате работы нами установлено, что проплавление осажденного кварцевого стекла, легированного иттербием и фосфором, приводит примерно к тринадцатикратному увеличению среднего размера кластеров. Показано, что, по крайней мере, часть кластеров не аморфна, а обладает кристаллической структурой близкой к  $\text{YbPO}_4$ .

#### *Список литературы*

1. Fomin V., Abramov M., Ferin A., Abramov A., Mochalov D., Platonov N., Gapontsev V. 10 kW single-mode fiber laser // 5th International Symposium on High Power Fiber Lasers and Their Applications. Saint-Petersburg, 2010.
2. Golant K.M. Surface plasma chemical vapor deposition: 20 years of application in glass synthesis for lightguides (a review) // Proc. on XXI International Congress on Glass. Strasbourg, France, 2007. P.L13.

Д.Ю. ЕРИН<sup>1,2</sup>, К.Н. НИЩЕВ<sup>1</sup>, С.Л. СЕМЁНОВ<sup>2</sup>,  
О.Н. ЕГОРОВА<sup>2</sup>, В.В. ВЕЛЬМИСКИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева

<sup>2</sup>Научный центр волоконной оптики РАН, Москва

## **СТЕКЛА ДЛЯ АКТИВНЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДОМ БЕСКОНТЕЙНЕРНОЙ ПЛАВКИ СТЕКЛА**

Описаны результаты исследования активных волоконных световодов, изготовленных методом «штабик-в-трубке». Стекло для сердцевины получено из наплава шихты бесконтейнерным способом.

D.J. ERIN<sup>1,2</sup>, K.N. NISHCHEV<sup>1</sup>, S.L. SEMJONOV<sup>2</sup>,  
O.N. EGOROVA<sup>2</sup>, V.V. VELMISKIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ogarev Mordovia State University, Saransk

<sup>2</sup>Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow

## **GLASSES FOR ACTIVE OPTICAL FIBERS MANUFACTURED BY CONTAINERLESS MELTING GLASS**

The results of the research of active optical fibers fabricated by “a rod -in- tube” were described. Glass core derived from the melting of the powder containerless way.

Трудность изготовления волоконных световодов с сердцевиной из многокомпонентного стекла заставляет искать новые подходы к решению этой задачи. Главным требованием к таким стеклам остается однородность его состава. В методе химического осаждения это задача решается подходом «снизу-вверх». На опорную трубу напыляются как можно тоньше слои стекла сердцевины. Однако, также существует подход «сверху-вниз». Изначально берется неоднородный материал и за счет технологических процессов достигается требуемая однородность. Из-за продолжительного времени и высокой температуры диффузии легирующих компонентов кварцевого стекла широкое распространение получил подход «снизу-вверх».

В данной работе мы попытались минимизировать «минусы» второго подхода и раскрыть его «плюсы». В обычной реализации подхода «сверху-вниз» - наплава шихты из тигля мы сталкиваемся с непреодолимыми противоречиями (в рамках изготовления стекол для

волоконной оптики). С одной стороны, для увеличения скорости диффузии необходима высокая скорость перемешивания и температура расплава. С другой, последние 2 фактора увеличивают степень загрязнения расплава за счет растворения материала тигля. Учитывая эти противоречия, мы разработали метод бесконтейнерной плавки стекломассы с использованием виброперемешивания расплава. Сущность метода заключается в следующем. Шихта спекалась в кварцевой трубе. Затем в спеченный материал, нагретый до температуры 1600-2000<sup>0</sup>С, вводились низкочастотные колебания для интенсификации процессов гомогенизации и осветления расплава. На полученный в результате такого процесса стержень нахлопывалась оболочка из кварцевого стекла Suprasil F300. Таким образом, получалась заготовка для вытяжки волоконных световодов.

В данной работе исследовались стекла состава 99,45SiO<sub>2</sub>-0,5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0,05Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Концентрация алюминия подбиралась таким образом, чтобы разница показателя преломления относительно кварцевого стекла составляла  $\Delta n=0,001-0,002$ . Такое соотношение позволяло изготовить одномодовые световоды с большим полем моды.

Анализ степени однородности материала осуществлялся с помощью сканирующего электронного микроскопа. Концентрация легирующих элементов варьировалась в пределах 10-20% относительно среднего уровня легирования.

Для определения уровня поглощения в материале был вытянут маломодовый световод 17/125мкм с защитной оболочкой из акрилата. Поглощение в области низких потерь в этом световоде составили порядка 100-150дб/км.

Для исследования генерационных свойств был вытянут световод 13/125 мкм в светоотражающим полимере. Длина волны отсечки полученного световода была в районе 1,06-1,07 мкм. Поглощение на  $\lambda=915$ нм составляло около 2 db/m. Эффективность лазерной генерации на длине 10м составила 76%. Порог лазерной генерации составил 1,2 Вт.

Таким образом, результаты исследования полученных световодов из стекла, изготовленного методом бесконтейнерной плавки с использованием виброперемешивания, показали хорошие характеристики и могут быть при оптимизации технологии использоваться в случаях, когда методом MCVD трудновыполнимо получить необходимые световоды.



А.Ф. КОСОЛАПОВ, Г.К. АЛАГАШЕВ, А.Н. КОЛЯДИН,  
А.Д. ПРЯМИКОВ, А.С. БИРЮКОВ, И.А. БУФЕТОВ,  
Е.М. ДИАНОВ

*Научный центр волоконной оптики РАН, Москва*

## **ПОЛЫЙ СВЕТОВОД С УМЕНЬШЕННЫМ ДИАМЕТРОМ СЕРДЦЕВИНЫ И ОТРАЖАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКОЙ ИЗ ДВОЙНЫХ КАПИЛЛЯРОВ**

Создан полый волоконный световод с уменьшенным диаметром сердцевины и оболочкой из двойных несприкасающихся капилляров. Оптические потери на длине волны 1850 нм не превысили 75 дБ/км при диаметре сердцевины 25 мкм.

A.F. KOSOLAPOV, G.K. ALAGASHEV, A.N. KOLYADIN,  
A.D. PRYAMIKOV, A.S. BIRIUKOV, I.A. BUFETOV,  
E.M. DIANOV

*Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow*

## **NESTED HOLLOW-CORE FIBER WITH DECREASED CORE DIAMETER**

We describe a nested silica hollow-core fiber with decreased to 25  $\mu\text{m}$  core diameter. A very low attenuation of 75 dB/km at 1850 nm is reported.

Существенная часть исследований полых световодов посвящены снижению в них оптических потерь. Расчёты в работе [1] показали, что в револьверных световодах (полых световодах, оболочка которых состоит из одного слоя несприкасающихся капилляров [2]) возможно снизить уровень потерь, введя внутрь каждого капилляра оболочки дополнительный капилляр со стенками той же толщины. Впервые подобные световоды представлены в работе [3], однако толщины внешних и внутренних капилляров в этом световоде отличаются почти в два раза, а минимальные потери составили 175 дБ/км на длине волны 480 нм при диаметре сердцевины 51 мкм.

В данной работе представлен револьверный световод с двойными капиллярами, толщины стенок которых отличаются не более чем на 10%. Спектр потерь световода и его поперечное сечение представлены на рис. 1. Диаметр сердцевины световода составляет 25 мкм, а минимальные потери составляют 75 дБ/км на длине волны 1850 нм.

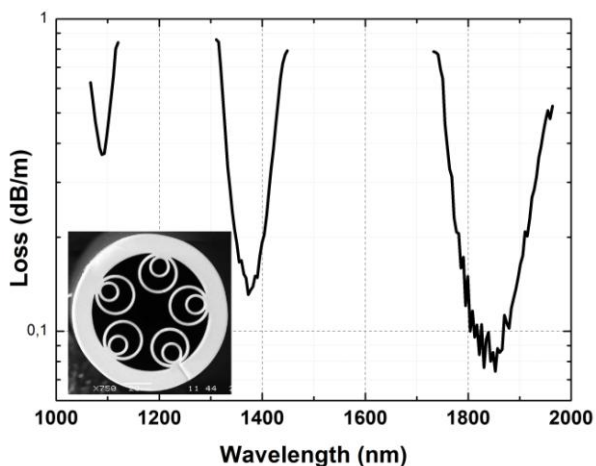


Рис. 1. Спектр потерь световода, вставка – фотография поперечного сечения световода, внешний диаметр световода 111 мкм, диаметр сердцевины – 25 мкм

Подобная конструкция световода позволила более чем в 2 раза уменьшить диаметр полый сердцевины световода без увеличения оптических потерь. Световоды такой конструкции, имея меньший диаметр полый сердцевины, должны с меньшими потерями соединяться со стандартными световодами. Кроме того, такие световоды при применении в устройствах, работающих на основе нелинейных явлений в газах, заполняющих сердцевину, с уменьшением диаметра сердцевины будут работать при соответственно более низких уровнях мощности излучения накачки.

Данная работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-02-99688 А и 15-02-08840 А.

#### *Список литературы*

1. Poletti F. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber // *Opt. Express*. 2014. V.22. No.20. P.23807.
2. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region // *Opt. Express*. 2013. V.21. No.8. P.9514–9519.
3. Belardi W. Design and properties of hollow antiresonant fibers for the visible and near infrared spectral range // *J. Light. Technol.* 2015. V.33. No.21. P.4497–4503.

М.А. БУХАРИН<sup>1,2</sup>, Н.Н. СКРЯБИН<sup>1,2</sup>, Д.В. ГАНИН<sup>3,4</sup>,  
Д.В. ХУДЯКОВ<sup>2,4</sup>, С.К. ВАРТАПЕТОВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

<sup>2</sup>ООО «Оптосистемы», Москва

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

<sup>4</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ПРЯМАЯ ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЗАПИСЬ СВЕТОВОДОВ НА МАЛЫХ ГЛУБИНАХ ЗАЛЕГАНИЯ ПОД ПОВЕРХНОСТЬЮ КРИСТАЛЛОВ**

Предложен способ формирования световедущих структур, индуцированных в кристалле ниобата лития посредством прямой фемтосекундной записи, на рекордно малой глубине под поверхностью кристалла (2-15 мкм). В работе было исследовано влияние тепловых эффектов на процесс создания структур и изучена их геометрия, позволяющая проектировать оптические световоды с характеристиками, необходимыми для практических применений.

M.A. BUKHARIN<sup>1,2</sup>, N.N. SKRYABIN<sup>1,2</sup>, D.V. GANIN<sup>3,4</sup>,  
D.V. KHUDYAKOV<sup>2,4</sup>, S.K. VARTAPETOV<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Optosystems Ltd., Moscow

<sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>4</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **DIRECT FEMTOSECOND WRITING OF WAVEGUIDES AT LOW DEPTHS UNDER THE SURFACE OF CRYSTALS**

There was proposed the technique of direct femtosecond writing of structures with induced refractive index in lithium niobate at record low depth under the surface of crystal (2-15  $\mu\text{m}$ ). In the paper we investigate influence of thermal effects on structures formation process and analyze its geometry for design of optical waveguides for the purposes of advanced applications.

Под действием сильно сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в оптически прозрачных средах может наблюдаться эффект перманентного изменения показателя преломления [1]. Он может быть использован для создания трехмерных структур в целях интегральной оптики [2]. Одной из наиболее важных задач в данной области является создание волноводов вблизи поверхности кристаллов, обладающих

сильным электрооптическим эффектом. Волноводы, записанные на малой глубине под поверхностью кристалла ( $<15$  мкм), являются основой быстрых ( $>10$  ГГц) электрооптических модуляторов с низким рабочим напряжением [3]. Актуальность исследования заключалась в том, что световоды, записанные при помощи фемтосекундного лазера смогут обладать малыми оптическими потерями и поддерживать любое состояние поляризации проходящего излучения в отличие от существующей альтернативной технологии (ионный обмен) не в полной мере удовлетворяющей потребностям прикладных задач [4].

В настоящей работе решалась проблема подавления негативных факторов, препятствующих фемтосекундной записи световодов на малой глубине под поверхностью образца [5]. В результате исследования была разработана технология, впервые позволяющая записывать волноводы на сверхмалой глубине (2-15 мкм) под поверхностью образца ( $\text{LiNbO}_3$ ). Для создания индуцированных структур использовался фемтосекундный лазер (360 фс, 1.04 мкм) и безмасляный микрообъектив с высокой числовой апертурой ( $\text{NA}=0.8$ ) для предотвращения оптического пробоя поверхности. В работе было исследовано влияния тепловых эффектов на процесс создания приповерхностных световодов и детально исследована геометрия создаваемых структур, позволяющая в дальнейшем проектировать оптические световоды с характеристиками, необходимыми для практических применений.

Полученные приповерхностные структуры, индуцированные на рекордно малой глубине под поверхностью кристалла, смогут стать основой для создания модуляторов лазерного излучения с широким спектром (например, лазеров ультракоротких импульсов), лазерных гироскопов и телекоммуникационных приборов.

#### *Список литературы*

1. Femtosecond Laser Micromachining / ed. R. Osellame, R. Ramponi, G. Cerullo. London: Springer-Verlag, 2012.
2. Gattass R.R., Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials // Nature Photonics. 2008. V.2. P.219-225.
3. Kostritskii S.M., Moretti P. Specific behavior of refractive indices in low-dose  $\text{He}^+$  implanted  $\text{LiNbO}_3$  waveguides // J. Appl. Phys. 2007. V.101. P.094109.
4. Eaton S.M., et al. High refractive index contrast in fused silica waveguides by tightly focused, high-repetition rate femtosecond laser // J. Non-Cryst. Sol. 2011. V.357. P.2387.
5. Vartapetov S.K., Ganin D.V., Lapshin K.E., Obidin A.Z. Femtosecond-laser fabrication of cyclic structures in the bulk of transparent dielectrics // Quant. Electron. 2015. V.45. P.725.

А.В. СОСУНОВ, Р.С. ПОНОМАРЕВ, А.Б. ВОЛЫНЦЕВ  
*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

**СВЯЗЬ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МОНИКРИСТАЛЛА  
НИОБАТА ЛИТИЯ С ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ  
ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ**

Различными структурными методами показано, что приповерхностный слой монокристалла ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) обладает несовершенной структурой. Предварительная очистка в перекисно-аммиачном растворе приводит к увеличению показателя преломления оптических волноводов, полученных методом протонного обмена, по сравнению со стандартной очисткой в парах изопропилового спирта. Эти факты важны при производстве интегрально-оптических схем на ниобате лития: повторяемость, оптические потери, дрейф показателя преломления.

A.V. SOSUNOV, R.S. PONOMAREV, A.B. VOLYNTSEV  
*Perm State National Research University*

**INFLUENCE OF LITHIUM NIOBATE SUBLAYER  
STRUCTURE TO REFRACTIVE INDEX OF OPTICAL  
WAVEGUIDES**

Various structural methods, the surface layer of a single crystal of lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ) has imperfect structure. Pretreatment peroxide in ammonia solution leads to increase in the refractive index of the optical waveguide produced by proton exchange, compared to standard cleaning in isopropyl alcohol vapor. These facts are important in the manufacture of integrated optical circuits on a lithium niobate: repeatability, optical loss, drift of the refractive index.

Уже более 30 лет монокристалл ниобата лития (НЛ) используется для создания компонентов интегральной оптики и оптоэлектроники [1]. Преимущество НЛ перед другими оптическими кристаллами заключается в малых оптических потерях и возможности относительно легко формировать на его поверхности оптические волноводы методом протонного обмена.

Оптические волноводы создаются на поверхности кристалла, и основной объем волновода лежит в слое глубиной не более 6 мкм. Известно, что даже после химико-механической полировки пластин НЛ

может быть образован дефектный слой глубиной до 15 мкм, а также множество разориентированных царапин на поверхности [2, 3].

Методом оптической микроскопии было обнаружено, что поверхность НЛ производства Sipat имеет множество царапин различной глубины под слоем материала, оставшегося после полировки. Стандартная очистка в парах изопропилового спирта не позволяла в должной мере вскрыть все дефекты поверхности пластин НЛ, поэтому для очистки пластин использовался перекисно-аммиачный раствор.

С помощью структурных методов, таких как сканирующая электронная микроскопия, прецизионный рентгеновский анализ и модовая спектроскопия было показано, что свойства протонообменных волноводов меняются в зависимости от того проходили пластины НЛ предварительно очистку или нет. Методом прецизионного рентгеновского анализа показано, что приповерхностный слой имеет несовершенную структуру. Методом электронной микроскопии на изломе образца был обнаружен дефектный приповерхностный слой глубиной до 20 мкм с четкой границей между непосредственно дефектной областью и совершенной структурой. Также результаты модовой спектроскопии показывают, что показатель преломления оптических волноводов увеличивается после предварительной очистки пластин НЛ.

Все полученные результаты свидетельствуют о том, что структура и состояние поверхности и поверхностного слоя, в котором создаются оптические волноводы, влияют на протекание процесса протонного обмена и соответственно на характеристики оптических волноводов.

Важно отметить, что данные структурные изменения могут приводить к нестабильности и дрейфу различных характеристик канальных волноводов [4], а также к невозпроизводимости результатов при производстве интегрально-оптических схем.

#### *Список литературы*

1. Arizmendi L. Photonic applications of lithium niobate crystals // *Physica Status Solidi*. 2004. V.201. №2. P.253-283.
2. Zhong Z.W. Recent advanced in polishing of advanced materials // *Materials Manufacturing Processing*. 2008. P.449-456.
3. Galinetto P., Marinone M., Grando D., Samoggia G., Caccavale F., Morbiato A., Musolino M. Micro-Raman analysis on LiNbO<sub>3</sub> substrates and surfaces: Compositional homogeneity and effects of etching and polishing processes on structural properties // *Optical Laser Engineering*. 2007. V.45. P.380-384.
4. Muller H.G., et al. Reduction of lattice defects in proton-exchanged lithium niobate waveguides // *Journal of Applied Physics*. 2011. V.110. P.033539.

К.С. ЛЕВЧЕНКО<sup>1</sup>, Г.Е. АДАМОВ<sup>1</sup>, В.А. БАРАЧЕВСКИЙ<sup>1,2</sup>,  
Е.П. ГРЕБЕННИКОВ<sup>1</sup>, Е.В. ЗИНОВЬЕВ, В.Р. КУРБАНГАЛЕЕВ<sup>1</sup>,  
П.Б. МАЛЫШЕВ<sup>1</sup>, Н.О. ПОРОШИН<sup>1</sup>, П.С. ШМЕЛИН<sup>1</sup>,  
К.А. ЧУДОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ЦНИТИ «Техномаш», Москва

<sup>2</sup>Центр фотохимии РАН, Москва

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СОДЕРЖАЩИЕ ФОТОХРОМНЫЕ И ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ДЛЯ ПЛАНАРНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛНОВОДОВ**

Синтезированы новые флуоресцирующие производные 1-тиенил-3-метил-9Н-тиено[3,4-*b*]хромон-9-она. Проведена их модификация, и изучены спектрально-кинетические свойства в растворе и в составе полимерных планарных волноводов.

K.S. LEVCHENKO<sup>1</sup>, G.E. ADAMOV<sup>1</sup>, V.A. BARACHEVSKI<sup>1,2</sup>,  
E.P. GREBENNIKOV<sup>1</sup>, E.V. ZINOVIEV<sup>1</sup>, V.R. KURBANGALEEV<sup>1</sup>,  
P.B. MALYSHEV<sup>1</sup>, N.O. POROSHIN<sup>1</sup>, P.S. SHMELIN<sup>1</sup>,  
K.A. CHUDOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>OJSC CSRIT "Technomash", Moscow

<sup>2</sup>Photochemistry Center of the RAS, Moscow

## **COMPOSITE MATERIALS CONTAINING PHOTOCROMIC AND FLUORESCENT COMPOUNDS FOR POLYMER PLANAR WAVEGUIDE**

New fluorescent derivatives of 1-thienyl-3-methyl-9H-thieno [3,4-*b*] chromone-9-one were synthesized. The spectral and kinetic properties of their modifications were studied in solution and in polymer planar waveguides.

Синтезированы новые флуоресцирующие производные 1-тиенил-3-метил-9Н-тиено[3,4-*b*]хромон-9-она[1]. Проведена их модификация и изучены спектрально-кинетические свойства. На их основе, с использованием ряда синтезированных фотохромных бензотиенильных дигетарилэтенон, получены системы, обеспечивающие обратимую фотоиндуцированную модуляцию флуоресценции.

Изготовлены полимерные волноводы, содержащие подобранные пары фотохром/люминофор. Пример спектров поглощения и флуоресценции такой пары показан на рис. 1.

Считывание записанной информации определяется как флуоресценцией, так и шумом, и спектральной чувствительностью пикселей фотоприемной матрицы, поэтому нами исследовалась зависимость интенсивности флуоресценции от плотности мощности считывающего излучения. Эти данные необходимы для определения количества возможных циклов записи/перезаписи применительно к конкретной фотоприемной матрице.

Исследование распространения возбуждающего флуоресценцию излучения в полимерном волноводе, содержащем люминофор/фотохром, показало необходимость оптимизации спектрального коэффициента поглощения фотохрома или способа внедрения пары люминофор/фотохром в полимерный волновод.

Полученные результаты открывают направления совершенствования фотохромных полимерных регистрирующих сред с неdestructивным флуоресцентным считыванием записанной в них информации при использовании, как в оперативной памяти большой информационной емкости, так и в системах хранения информации с возможностью многократовой записи/перезаписи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-07-00733).

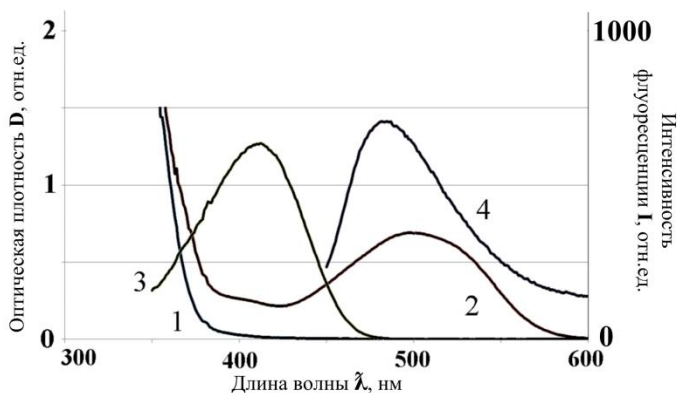


Рис. 1. Спектры поглощения и флуоресценции полученных соединений:

- 1,2 – спектры поглощения до и после облучения фотохрома УФ,
- 3,4 – спектры поглощения и флуоресценции люминофора

*Список литературы*

1. Levchenko K.S., et. al. // Tetrahedron Letters. 2015. V.56. Is.9. P.1085-1088.



К.А. БОРОДАКО<sup>1</sup>, А.А. ГРИГОРЬЕВ<sup>1</sup>, А.В. ШЕЛЯКОВ<sup>1</sup>,  
Н.Н. СИТНИКОВ<sup>1,2</sup>, Д.В. ШЕЙФЕР<sup>3,4</sup>, А.А. ИВАНОВ<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва

<sup>3</sup>Университет Гамбурга, Германия

<sup>4</sup>Немецкий электронный синхротрон, Гамбург, Германия

## МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ БЫСТРОЗАКАЛЕННОГО СПЛАВА TiNiCu ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

Работа посвящена изучению влияния параметров комбинированного воздействия термомеханической и лазерной обработки тонких лент из быстрозакаленного сплава TiNiCu на свойства обратимого эффекта памяти формы. Показано, что увеличение плотности энергии лазерного излучения и величины внешнего механического напряжения приводит к росту обратимой деформации формируемого аморфно-кристаллического композита в интервале мартенситного превращения.

К.А. BORODAKO<sup>1</sup>, А.А. GRIGORIEV<sup>1</sup>, А.В. SHELYAKOV<sup>1</sup>,  
N.N. SITNIKOV<sup>1,2</sup>, D.V. SHEYFER<sup>3,4</sup>, А.А. IVANOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Keldysh Research Center, Moscow

<sup>3</sup>University of Hamburg, Germany

<sup>4</sup>Deutsches Elektronen-Synchrotron, Hamburg, Germany

## MODIFICATION OF PROPERTIES OF RAPIDLY QUENCHED TiNiCu ALLOY UNDER LASER RADIATION

The work deals with the study of the influence of combined action of thermo-mechanical and laser treatments of rapidly quenched TiNiCu thin ribbons on the properties of two-way shape memory effect. It was shown that increasing of the energy density of the laser radiation and the external mechanical stress leads to growth of the reversible strain of the received amorphous-crystalline composite in the interval of martensitic transformation.

Развитие наукоемких технологий в большинстве отраслей промышленности связано с миниатюризацией, повышением экономичности и быстродействия исполнительных элементов и микроустройств на их основе. Это приводит к необходимости разработки и исследования новых функциональных материалов. В последнее время показана эффективность использования сплавов с эффектом памяти

формы (ЭПФ), в частности тонких (толщиной до 20 мкм) лент, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава, для создания различного рода микроустройств [1]. Практическое использование сплавов с ЭПФ в микромеханических устройствах предполагает, как правило, обратимое изменение формы в цикле нагрев-охлаждение. Недавно нами показано[2, 3], что обработка поверхности сплава TiNiCu излучением эксимерного лазера ведет к формированию аморфно-кристаллического композита, способного совершать циклическую работу за счёт реализации обратимого ЭПФ.

Целью данной работы являлось исследование влияния комбинированного воздействия термомеханической и лазерной обработки быстрозакаленного сплава TiNiCu на его термомеханические свойства при реализации обратимого ЭПФ.

В работе исследовался сплав  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  в виде ленты толщиной 40 мкм и шириной 2 мм. Лента изготавливалась методом быстрой закалки из расплава с последующей изотермической кристаллизацией в муфельной печи при температурах 500°C и 550°C с различным временем обработки от 2 до 10 мин. Показано, что увеличение времени и длительности термообработки приводит к росту температур мартенситного перехода, а также может вызывать охрупчивание материала.

Для формирования обратимого ЭПФ в работе была проведена лазерная обработка кристаллических образцов, подвергнутых деформации растяжения в процессе прямого мартенситного превращения под действием внешнего механического напряжения в диапазоне от 20 до 120 МПа. Плотности энергии излучения эксимерного лазера KrF с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 20 нс варьировалась в диапазоне от 5 до 17 мДж/мм<sup>2</sup>. Проведено моделирование взаимодействия лазерного излучения с поверхностью сплавов на основе титана. Показано, что после лазерной обработки образцы приобрели ярко-выраженный обратимый ЭПФ. Установлено, что большей амплитуды обратимой изгибной деформации аморфно-кристаллического композита в интервале мартенситного превращения можно добиться как созданием высоких напряжений в материале, так и воздействием более мощного лазерного импульса.

#### *Список литературы*

1. Shelyakov A.V., et. al. // Int. J. of Smart and Nano Materials. 2011. V.2. No.2. P.68-77.
2. Бородако К.А., Шейфер Д.В., Шеляков А.В., Ситников Н.Н. // IV Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: Сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.90-91.
3. Shelyakov A.V., Sitnikov N.N., Borodako K.A., et. al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.108–113.

Ф.И. ЗОЛОТОВ<sup>1,2</sup>, Ю.Б. ВАХТОМИН<sup>1,2</sup>, А.В. ДИВОЧИЙ<sup>2</sup>,  
В.А. СЕЛЕЗНЕВ<sup>2</sup>, К.В. СМИРНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский педагогический государственный университет

<sup>2</sup>ЗАО «Сверхпроводниковые нанотехнологии», Москва

<sup>3</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
Москва

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ РЕЗОНАТОРНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ NBN ДЕТЕКТОРОВ ИК-ФОТОНОВ**

Представлены результаты разработки технологии создания NbN сверхпроводниковых однофотонных детекторов ИК-диапазона с использованием дополнительных резонаторных структур. Основной решенной задачей является оптимизация процесса осаждения NbN пленок на Si подложки с предварительно нанесенными металлическими зеркалами и диэлектрическим слоем SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной  $\lambda/4$ . Исследования квантовой эффективности (QE) созданных детекторов, проведенные при температуре 1.6 K и  $\lambda=1.55$  мкм, показали трехкратное увеличение квантовой эффективности детектора с резонаторными структурами (QE $\geq$ 60%) по сравнению с QE традиционных Si-NbN детекторов.

P.I. ZOLOTOV<sup>1,2</sup>, Yu.B. VAKHTOMIN<sup>1,2</sup>, A.V. DIVOCHIY<sup>2</sup>,  
V.A. SELEZNEV<sup>2</sup>, K.V. SMIRNOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Pedagogical University

<sup>2</sup>CJSC "Superconducting Nanotechnology", Moscow

<sup>3</sup>National Research University "Higher School of Economics", Moscow

## **TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF RESONATOR-BASED STRUCTURES FOR EFFICIENCY INCREASING OF NBN DETECTORS OF IR SINGLE PHOTONS**

This paper presents a technology of fabrication of NbN superconductive single-photon detectors, using resonator structures. The main results are related to optimization of the process of NbN sputtering over substrate with metallic mirrors and SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> layers  $\lambda/4$  thick. Investigation of the quantum efficiency of fabricated devices at 1.6 K on 1.55  $\mu$ m showed triple-magnified value compared to standard Si/NbN structures.

Востребованность ИК однофотонных детекторов определяется целым рядом направлений их практического использования [1], которые, несомненно, нуждаются в постоянном улучшении свойств приемников. Примером значительного улучшения приемников ИК-фотонов является создание принципиально нового типа устройств – сверхпроводниковых однофотонных детекторов (SSPD) [2], которые по всем основным параметрам превосходят традиционные детекторы фотонов. Так, джиттер и мертвое время SSPD составляют  $\leq 25$  пс и  $\leq 2$  нс [3] соответственно, скорость счета  $\geq 100$  МГц, уровень темновых отсчетов  $\leq 1$  с<sup>-1</sup>[4]. Однако, ключевой характеристикой любого счетчика фотонов является квантовая эффективность (QE). В SSPD срабатывание происходит за счет поглощения фотона пленкой, а вероятность поглощения для ультратонких (~4 нм) пленок NbN составляет ~20÷30%. Таким образом, использование резонаторных структур способно многократно увеличить коэффициент поглощения излучения пленкой и квантовую эффективность детектора.

Нами был разработан технологический маршрут и изготовлены NbN SSPD с дополнительными резонаторными структурами на основе металлических зеркал и слоев диэлектрика (SiO<sub>2</sub> или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). При этом была решена одна из основных задач – получение ультратонких пленок NbN с высокими сверхпроводниковыми параметрами на предварительно выращенных диэлектрических слоях. Проведенные при температуре 1.6 К и на длинах волн 1.3-1.55 мкм измерения квантовой эффективности созданных SSPD подтверждают расчетное значение чувствительности детекторов в заданном спектральном диапазоне – абсолютное значение QE достигло 60%, что в три раза превосходит значения квантовой эффективности SSPD без резонаторных структур.

#### *Список литературы*

1. Korneev A., et. al. // IEEE transactions on applied superconductivity. 2013. V.23. No.3.
2. Gol'tsman G.N., et. al. // Applied Physics Letters. 2001. V.79. No.6. P.705-707.
3. Sidorova M.V., Divochiy A.V., Vakhtomin Yu.B., Smirnov K.V. Ultrafast superconducting single-photon detector with a reduced active area coupled to a tapered lensed single-mode fiber // J. Nanophoton.
4. Smirnov K., et. al. // Applied Physics Express. 2015. V.8. No.2. P.022501.

И.А. ХРАМЦОВ, Д.Ю. ФЕДЯНИН

*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный*

## **ИНТЕГРИРОВАННЫЙ МЕДЬ-ГЕРМАНИЙ-МЕДНЫЙ ФОТОДЕТЕКТОР ДЛЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОФОТОНИКИ**

Работающие уже на пределе электрические межсоединения перспективно заменить на оптические для уменьшения энергопотребления и увеличения степени интеграции на чипе. Для этого необходима разработка высокоскоростных интегрированных оптоэлектронных устройств совместимых с комплементарной металл-оксид-полупроводник (КМОП) технологией. В данной работе предлагается германиевый металл-полупроводник-металлический (МПМ) фотодетектор для детектирования сигнала на длине волны 1550 нм, характеризующийся субволновыми размерами и выходными параметрами, сопоставимыми с современными интегрированными фотодетекторами.

I.A. KHRAMTCOV, D.Yu. FEDYANIN

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

## **INTEGRATED Cu/Ge/Cu PHOTODETECTOR FOR SILICON NANOPHOTONICS**

It is perspective to replace on-chip electrical interconnects working nowadays at their maximum capacity with optical ones in order to decrease energy consumption and increase the integration density. In order to do this, high-speed low-power optoelectronics devices compatible with CMOS should be developed. In this work we propose a Ge metal-semiconductor-metal photodetector, which provides on-chip process with high responsivity (0.7 A/W), high photocurrent to dark current ratio (~100) at supply voltage of only 200 mV.

Для улучшения производительности современных микропроцессоров, перспективно заменить электрические межсоединения на оптические. Данная замена позволит уменьшить энергопотребление и увеличить плотность интеграции на чипе. Для этого необходима разработка высокоскоростных компактных оптоэлектрических устройств, совместимых с современной КМОП технологией построения электронных схем, таких как фотодетекторы, интегрированные в нанофотонные схемы.

Современный прогресс в кремниевой фотонике заставляет фотодетекторы характеризоваться как и высокой пропускной способностью, так и компактными размерами и работой при малых

выходных мощностях. Для этого требуется, чтобы темновые токи на выходе из фотодетектора были малы. Поэтому, металл-полупроводник-металлические (МПМ) фотодетекторы являются перспективными, т.к. два контакта Шоттки, расположенные “спина к спине” позволяют уменьшить темновые токи, несмотря на недостатки, связанные с проблемами достоверного контроля высоты барьера Шоттки на границе металл-полупроводник. Уменьшение размеров МПМ фотодетектора может понизить ёмкость фотодетектора до  $\sim 1$  фФ, что позволит реализовать “receiverless” дизайн, т.е. с большим выходным напряжением, позволяющим избежать использование высокоэнергопотребляющих трансимпедансных усилителей [1, 2]. Также, это позволит повысить ограничения в пропускной способности, связанные с характерными  $RC$  задержками.

В этой работе мы предлагаем германиевый МПМ фотодетектор, характеризующийся субволновыми размерами и выходными параметрами, сопоставимыми с современными интегрированными фотодетекторами. Проведенное самосогласованное моделирование, показало, что, несмотря на малую высоту барьера Шоттки на контакте медь/германий предложенный фотодетектор демонстрирует работу на малых напряжениях смещения (200 мВ) и при этом имеет большой отклик (0.7 А/Вт) и высокое отношение фототока к темновому току ( $\sim 100$ ).

*Список литературы*

1. Miller D. // Proc. IEEE. 2009. V.97. P.1166.
2. Assefa S., Solomon A., Fengnian X., Green W.M.J., Schow C.L., Rylyakov A.V., Vlasov Y.A. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2010. V.16. P.1376.

И.Д. БУРЛАКОВ<sup>1</sup>, А.И. ЕРЕМЧУК<sup>1,3</sup>, К.О. БОЛТАРЬ<sup>1,2</sup>,  
А.А. ЛОПУХИН<sup>1</sup>, П.В. ВЛАСОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион», Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

<sup>3</sup>АО «Швабе-Фотосистемы», Москва

## МАТРИЧНОЕ ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР АНТИМОНИДА ИНДИЯ

В работе исследованы фотоэлектрические характеристики матричного фотоприемного устройства (МФПУ) формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм с фоточувствительным элементом, изготовленным в эпитаксиальном слое антимонида индия на высоколегированной подложке. Проведено сравнение с аналогичными серийными МФПУ на основе объемного антимонида индия.

I.D. BURLAKOV<sup>1</sup>, A.I. EREMCHUK<sup>1,3</sup>, K.O. BOLTAR<sup>1,2</sup>,  
A.A. LOPUHIN<sup>1</sup>, P.V. VLASOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «RD&P Center «Orion», Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

<sup>3</sup>JSC «Shvabe-Photosystem», Moscow

## EPITAXIAL InSb FOCAL PLANE ARRAY

Focal plane array (FPA) 320x256 InSb Detectors performance created in epitaxial layer on high doping substrate are investigated. Comparison of epitaxial FPA with similar serial FPA on the basis of volume InSb is spent.

Сегодня лучшие матричные фотоприемные устройства (МФПУ) средневолнового ИК-диапазона изготавливаются на основе фотодиодов из антимонида индия (InSb) [1]. В АО «НПО «Орион» разработано и выпускается серийно МФПУ на основе объемного InSb формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм с охладителем типа интегральный Стирлинг и блоком сопряжения [2, 3].

В работе исследованы фотоэлектрические характеристики аналогичного МФПУ, в котором фоточувствительный элемент изготовлен в эпитаксиальном слое InSb на высоколегированной подложке. Для изготовления активного элемента МФПУ – InSb фотодиода – использовалась гибридная технология. Нелегированный активный слой выращивался методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на

высоколегированных подложках  $n^+-\text{InSb}$  в ИФП СО РАН (Новосибирск), а  $p$ -слой формировался имплантацией ионов  $\text{Be}^+$  в АО «НПО «Орион» (Москва). Для изготовления матриц на основе полученных эпитаксиальных структур использовалась мезотехнология с глубиной разделения элементов  $\sim 1$  мкм. Матрицы фоточувствительных элементов гибридизировались индиевыми микроконтактами с БИС считывания формата 320x256 элементов. Далее подложка утоньшалась по отработанной технологии для объемных МФПУ до толщины  $\sim 15$  мкм и просветлялась с помощью напыления  $\text{ZnS}$  с тыльной стороны. Для уменьшения дефектности и темновых токов, повышения однородности характеристик необходимо совершенствовать технологию подготовки подложки перед эпитаксией и качество пассивации поверхности мезаструктур, осуществлять формирование  $p$ - $n$  переходов в процессе роста.

Таблица 1. Сравнение фотоэлектрических характеристик МФПУ на эпитаксиальном и объемном  $\text{InSb}$  (при температуре 80К)

Наименование параметра, ед. изм.	МФПУ на эпитаксиальном $\text{InSb}$	МФПУ на объемном $\text{InSb}$
Время накопления, соответствующее уровню 0,7 от насыщения сигнала (при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:1), мс	1,46	0,54
Среднее значение ЭШРТ, мК	10,5	11,4
Количество дефектных элементов, %	0,12	0,24
Максимальный дефектный кластер, эл.	3	15
Длинноволновая и коротковолновая границы спектр. чувствительности по уровню 0,5 мкм	4,92 4,32	4,98 2,93
Квантовый выход, %	56	85
Фотоэлектрическая взаимосвязь, %	9	13
МРРТ (14 штрих/мм), мК	100	240
Темновой ток, пА	24,5	8
Динамическая взаимосвязь, %	1,9	0,8

*Список литературы*

1. Rogalski A. // Progress in Quantum Electronics. 2012. V.36. P.342-473.
2. Болтарь К.О., Киселева Л.В., Лопухин А.А., Савостин А.В. Патент № 2460174. 2012.
3. Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А., Полунеев В.В., Рябова А.А. // Успехи прикладной физики. 2013. №6. С.733.



И.Р. ГАБИТОВ<sup>1,2</sup>, Ф. КУППЕРС<sup>3</sup>, М.С. ШКАРАЕВ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Университет Аризоны Тусон, США

<sup>2</sup>Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.

<sup>3</sup>Дармштадтский технический университет, Германия

<sup>4</sup>Университет штата Айова, Эймс, США

## **МАСШТАБНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НИЧТОЖНЫХ ШАНСОВ: ОШИБКИ В ОПТОВОЛОКОННЫХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ**

Проведён анализ статистических свойств ошибок в оптоволоконных линиях при наличии шума усилителей и пространственной неоднородности волокна.

I.R. GABITOV<sup>1,2</sup>, F. KUPPERS<sup>3</sup>, M.S. SHKARAYEV<sup>4</sup>

<sup>1</sup>University of Arizona, Tucson, USA

<sup>2</sup>Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region

<sup>3</sup>Technical University of Darmstadt, Germany

<sup>4</sup>Iowa State University, Ames, USA

## **GROSS IMPACT OF SLIM CHANCES: ERRORS IN OPTICAL FIBER COMMUNICATION SYSTEMS**

The analysis of the statistical properties of errors in optical fiber communication systems in the presence of noise amplifier and polarization mode dispersion of fiber.

Прогресс в области высокоскоростной передачи информации, достигнутый за последние двадцать лет, привел к существенному увеличению производительности оптоволоконных систем связи. Наиболее впечатляющие результаты достигнуты благодаря развитию когерентных методов передачи информации, которые позволили преодолеть серьёзные ограничения для технологий того времени связанные в основном с необходимостью использования очень коротких импульсов в качестве носителей информации [1]. Использование когерентных методов передачи в оптических волокнах представляет пример удачной адаптации хорошо известных методов радиотехники к условиям оптики; использования ортогональных поляризаций сигналов; и перехода от бинарной к многосимвольной системе передачи. Все это позволило существенным образом увеличить производительность линий связи без изменения ширины битового интервала времени (без существенного сокращения длительности импульсов). Дальнейший рост производительности оптоволоконных систем потребует сокращения

битового интервала, что с неизбежностью приведет к необходимости решения проблем связанных с сокращением длительности импульсов.

Оценка уровня ошибок в оптоволоконных системах при воздействии шумов усилителя и пространственной неоднородности волокна в виде дисперсии поляризационных мод представляет одну из таких проблем. Учитывая высокие требования к уровню ошибок в оптоволоконных системах ( $10^{-9}$ - $10^{-12}$ ), компьютерное моделирование методом Монте-Карло при таких низких значениях вероятностей не представляется возможным. Специальные методы типа “Importance Sampling”, разработанные для изучения статистических свойств редких событий, также ненадежны. Измерение уровня ошибок после изготовления линий связи не позволяет решить проблем оптимизации линий в процессе их разработки.

Нами предложен метод анализа статистических свойств ошибок в оптоволоконных линиях при наличии шума усилителей и пространственной неоднородности волокна (PMD) [2]. Показано, что в данном случае уровень ошибок является флуктуирующей величиной, и его функция распределения зависит от способа обработки сигнала на приёмном терминале. В простейшем случае ее хвосты подчиняются логнормальному закону  $\log[S(B)] \sim -\frac{D_{\xi}^2 L}{D_m} \log^2\left(\frac{B}{B_0}\right)$ , поэтому являются медленно спадающими. Здесь функция  $S(B)$  является плотностью вероятности распределения ошибок  $B$ ,  $D_m$  и  $D_{\xi}$  интенсивности PMD и шума,  $B_0$  – среднее значение уровня ошибок,  $L$  – длина линии связи. Из полученного результата следует что: 1) флуктуации ошибок определяются совокупностью обоих факторов, которые не могут рассматриваться отдельно; 2) малость этих факторов не гарантирует качество передачи – отношение  $D_{\xi}^2 L/D_m$  не обязательно мало, если  $D_m$  и  $D_{\xi}$  малы по отдельности; 3) уменьшение спонтанного шума не гарантирует улучшение качества передачи – при этом возрастает вероятность больших значений ошибок (утолщаются хвосты распределения  $S(B)$ ); 4) увеличение интенсивности шума  $D_{\xi}$  или уменьшение  $D_m$  приводит к уменьшению флуктуаций ошибок. Заметим, что уменьшение флуктуации ошибок при увеличении шума  $D_{\xi}$  не приводит к улучшению качества передачи, т.к. в этом случае возрастает среднее значение уровня ошибок. Выводы исследований были проверены экспериментально, получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов.

#### Список литературы

1. Kikuchi K. // Journal of lightwave tech. 2016. V.34(1). P.1-23.
2. Chernyak V., Chertkov M., Gabitov I, et.al. // J. of lightwave tech. 2004. V.22(4). P.1155.

А.Л. ТОЛСТИК

*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАФИЯ И СИНГУЛЯРНАЯ ОПТИКА**

В докладе представлено новое направление динамической голографии, связанное с записью сингулярных голограмм, формируемых при интерференции гауссовых и сингулярных световых полей (оптических вихрей). Рассмотрены голографические методы преобразования топологического заряда и поляризации пучка и предложено их использование в качестве информационных параметров для кодирования информации.

A.L. TOLSTIK

*Belarusian State University, Minsk*

## **DYNAMIC HOLOGRAPHY AND SINGULAR OPTICS**

The paper presents a new trend in dynamic holography associated with recording of singular holograms formed on interference of Gaussian and singular light beams (optical vortexes). The holographic methods for transformation of the topological charge and beam polarization are considered together with their applications as information parameters for data encoding.

Преобразования световых полей динамическими голограммами являются признанными методами управления лазерными пучками и оптической обработки изображений, позволяющими осуществлять контролируемое преобразование пространственной структуры и фазы световой волны. В основе записи динамических голограмм лежит нелинейное изменение показателя преломления и (или) коэффициента поглощения среды, в которой формируется голограмма, что позволяет также использовать динамические решетки для измерения разнообразных параметров нелинейных сред.

Традиционно динамические голограммы записываются в средах с кубической нелинейностью. Расширение возможностей дифракционных методов преобразования световых полей связано с переходом к нелинейной записи динамических голограмм, реализуемой в средах при проявлении нелинейностей пятого и более высоких порядков. При нелинейной голографической записи появляются новые компоненты в Фурье-разложении нелинейной восприимчивости среды по

пространственным гармоникам динамической решетки, что позволяет реализовать дифракцию считывающего луча в брэгговском режиме во второй и более высокие порядки за счет изменения направления распространения или частоты считывающей волны [1].

В представленном докладе изложены основные теоретические и экспериментальные результаты по преобразованию световых полей динамическими голограммами в условиях проявления нелинейностей высших порядков. Особое внимание уделено новому направлению динамической голографии, связанному с записью сингулярных голограмм, формируемых при интерференции гауссовых и сингулярных световых полей (оптических вихрей). Интерес к таким голограммам обусловлен возможностью управления сложным волновым фронтом световых пучков, включая их топологическую структуру [2].

Топологическая структура сингулярных световых пучков обусловлена наличием на волновом фронте особых точек – винтовых дислокаций, в которых интенсивность обращается в ноль, а фаза не определена. При обходе вокруг винтовой дислокации по сечению пучка фаза изменяется на величину  $2\pi l$ , где  $l$  величина, называемая топологическим зарядом. Для формирования сингулярных световых пучков изготовлены голографические транспаранты на основе слоев полиметилметакрилата с фенантрехиноном в качестве регистрирующего материала, преобразующие гауссовые световые пучки и импульсы в сингулярные. Выбор материала обусловлен возможностью получения фазовых объемных голограмм с дифракционной эффективностью близкой к 100 %, а также прозрачностью экспонированного материала в видимой и ближней ИК-области спектра.

Использование схем нелинейной голографической записи позволило реализовать инвертирование и мультиплицирование топологического заряда, а также частотное преобразование оптических вихрей из ИК-области спектра в видимую. Дополнительные возможности появляются в схеме записи динамических голограмм, когда в качестве как сигнальной, так опорной и считывающей волн используются сингулярные световые пучки. В этом случае величина топологического заряда дифрагированного пучка определяется выражением:  $l_D = M l_1 + l_2 - M l_S$ , где  $M$  – порядок дифракции,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_S$ ,  $l_D$  – топологические заряды опорной, считывающей, сигнальной и дифрагированной волн, соответственно. Из приведенного выражения видно, что при реализации нелинейного взаимодействия сингулярных световых пучков появляется возможность осуществления алгебраических операций (сложение, вычитание, умножение на целое

число) при использовании топологического заряда в качестве информационного параметра.

Дополнительные возможности открывает поляризационная запись сингулярных голограмм. При поляризационно-голографической записи опорная и сигнальная волны поляризованы таким образом, что суммарная интенсивность этих волн остается постоянной и имеет место только пространственная модуляция состояния поляризации света в соответствии с разностью фаз записываемых голограмму волн. Однако и в этих условиях в резонансных средах возможно формирование динамических решеток вследствие зависимости интенсивности насыщения поглощения от состояния поляризации лазерного излучения. На основе поляризационных динамических голограмм реализовано управление поляризацией сингулярных световых пучков, включая поворот плоскости поляризации, а также трансформацию линейной поляризации излучения в круговую или эллиптическую.

Таким образом, приведенные результаты иллюстрируют широкие возможности использования динамических голограмм в разнообразных системах управления пространственной структурой лазерных пучков. Световые пучки, дифрагированные на различных пространственных компонентах динамической решетки, отличаются как направлением распространения, так и пространственной структурой волнового фронта. Увеличение порядка дифракции приводит к усилению фазовых искажений. Сглаживание пространственной структуры волнового фронта имеет место при увеличении частоты считываемой волны. При этом возможна реализация обращения волнового фронта с одновременным преобразованием частоты излучения, что перспективно для визуализации сложных ИК-изображений. Запись динамических голограмм сингулярными световыми пучками позволяет реализовать мультиплицирование топологического заряда, используя различные порядки дифракции. Введение новых информационных параметров (поляризации излучения и топологического заряда) позволяет объединить возможности поляризационной динамической голографии и сингулярной оптики и на новых принципах осуществлять кодирование информации.

#### *Список литературы*

1. Rubanov A.S., Tolstik A.L., Karpuk S.M., Ormachea O. Nonlinear formation of dynamic holograms and multiwave mixing in resonant media // Optics Communications. 2000. V.181. No.1-3. P.183-190.
2. Tolstik A.L. Сингулярная динамическая голография // Известия вузов. Физика. 2015. Т.58. №10. С.65-74.

В.А. СУХАРЕВ, И.С. ЖУРКОВА, Д.Д. ПЕРЛОВ<sup>1</sup>,  
А.П. САДОВСКИЙ

*ООО НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино*

<sup>1</sup>*Корпорация IPG Photonics, Оксфорд, США*

## **НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИИ РОСТА КРИСТАЛЛОВ LBO ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Проведён краткий исторический обзор развития технологии роста кристаллов трибората лития. Представлен новый подход к технологии выращивания оптически нелинейных кристаллов трибората лития лазерного качества. Обсуждаются параметры новой технологии производства монокристаллических бультрибората лития. Дана оценка качества выращенных кристаллов трибората лития.

V.A. SUKHAREV, I.S. ZHYRKOVA, D.D. PERLOV<sup>1</sup>,  
A.P. SADOVSKIY

*IRE-Polus Corporation, Fryazino*

<sup>1</sup>*IPG Photonics Corporation, Oxford, USA*

## **NEW APPROACH TO GROWTH OF LBO CRYSTALS FOR LASER APPLICATIONS**

A brief historical review of development of the crystal growth technology of lithium triborate is presented. A new approach to growth of LBO crystals for laser applications is proposed. Optimization of LBO crystal growth conditions is discussed. Quality of as-grown material has been evaluated.

Промышленность и наука наращивают спрос на лазерные системы в видимом и ультрафиолетовом диапазоне. Как следствие наблюдается рост потребления кристаллических материалов для их создания. В настоящее время широкое распространение получили нелинейные кристаллы LBO (LiB3O5), КТР (KTiOPO4), ВВО (BaB2O4), CLBO (CsLiB6O10). LBO при этом становится основным материалом в лазерной индустрии для преобразования излучения из области 1-го микрона во вторую и третью гармонику.

Основными достоинствами кристалла трибората лития (LBO) являются: высокая эффективность, устойчивость к деградации под влиянием лазерного излучения, высокий порог лазерного разрушения

(>10 Гвт/см<sup>2</sup>), широкая область прозрачности (160-2200 нм), механическая стабильность.

Впервые фаза триборат лития была обнаружена в 1926 году [1]. В 1958 году была подробно изучена система Li<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в которой была определена область существования LBO в диапазоне температур 595-834°С с инконгруэнтным типом плавления [2]. Первые объёмные монокристаллы были получены только в 1978 году [3]. В 1989 году впервые были продемонстрированы уникальные нелинейные оптические свойства кристалла LBOи предложена область применения [4].

Наибольшее распространение для выращивания объёмных кристаллов LBO получил метод Киропулоса из раствора в расплаве. В течение длительного времени кристаллы LBO выращивались с использованием B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в качестве растворителя. Высокая вязкость расплава создавала ряд проблем с недостаточными размерами буль и качеством материала.

Применение растворителя с низкой вязкостью на основе лития молибденовокислого позволило значительно улучшить качество выращиваемых кристаллов [5]. Тем не менее, по-прежнему остаются общие проблемы технологии роста буль монокристаллов LBO. Часто в объёмных кристаллах LBO можно обнаружить захваты флюса, захваты второй боратной фазы, трещины, ростовую полосчатость. Оптическое поглощение некоторых буль LBO представляет проблему в ряде случаев.

Нами разработан новый подход к технологии роста высококачественных кристаллов LBO. За основу взят широко известный метод TSSG (рост на поверхности раствор-расплава на затравочный кристалл), используя молибденовокислый растворитель. Применена концепция высокой степени пересыщения раствор-расплава. Последнее, в сочетании с вытягиванием растущего кристалла, существенно меняет его морфологию. Не происходит формирование быстро растущих граней, конкуренция между которыми может приводить к упомянутым выше проблемам качества выращенного кристалла. Кристалл в основном формируется ростовыми гранями [011] и [110] свободный от каких-либо включений и захватов растворителя (рис. 1). Демонстрировано увеличение скорости роста граней до 5 мм в сутки при отсутствии ростовой полосчатости. Время выращивания були существенно сократилось, себестоимость материала заметно снизилась. Кроме того, були, выращенные разработанным методом, имеют технологически простую и удобную в обработке внешнюю форму увеличивающую выход годного изготовленных лазерных элементов. На данный момент серийно реализуется ростовой процесс получения буль до 500 г, разработанный

подход легко масштабируется до получения кристаллов массой более 2кг из относительно малых тиглей.

Нелинейные оптические элементы изготовленные из выращенных кристаллов демонстрируют рекордно низкое поглощение на 1064/532нм, сравнимое с лучшими литературными результатами.



Рис. 1. Фотографии выращенных монокристаллов LBO массой от 400 до 500 г

*Список литературы*

1. Mazzetti C., Carli F.D. Boratianidri di litio, cadmio, piombo, manganese // *Gazetta Chimical taliana*. 1926. №23. P.56.
2. Sastry B.S.R., Hummel F.A. Studies in Lithium Oxide Systems: I,  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3$  // *Journal of the American Ceramic Society*. 1958. V.41. No.1. P.7-17.
3. Konig H., Hoppe R.. Z. Zurkenntnis von  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ . Z. anorg. allg. // *Chem*.1978. No.439. P.71-79.
4. Chen C. New nonlinear-optical crystal:  $\text{LiB}_3\text{O}_5$ . J. Optical Society of America. 1989. V.6. No.4. P.616-621.
5. Pylneva N, Kosyakov V, Yurkin A., et.al. Real structure of  $\text{LiB}_3\text{O}_5$  (LBO) crystals grown in  $\text{Li}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{MoO}_3$  system // *Cryst. Res. Technol*. 2001. V.36(12). P.1377-1384.



И.В. ДЗЕДОЛИК

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ФОНОН-ПОЛЯРИТОНЫ И ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ**

Поляритоника и плазмоника – две взаимосвязанные области интенсивных научных исследований, широкий интерес к которым связан с перспективами применения теоретических и экспериментальных результатов в фундаментальной и прикладной физике. Линейные и нелинейные свойства фонон-поляритонов и плазмон поляритонов позволяют проектировать и создавать широкий спектр устройств, работающих на оптических частотах и имеющих наноразмеры.

I. V. DZEDOLIK

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **LINEAR AND NONLINEAR PHONON-POLARITONS AND PLASMON-POLARITONS IN DIFFERENT MEDIA**

Polaritonics and plasmonics are two related research fields, and they attract wide researchers' interest in connection with the application prospects of theoretical and experimental results in the fundamental and applied physics. Linear and nonlinear properties of the phonon-polaritons and plasmon-polaritons allow us to design and create wide range of devices that operate at the optical frequencies and have nanosizes.

Поляритоны – квазичастицы, возникающие в результате взаимодействия фотонов и фононов в различных средах, обладающих как линейными, так и нелинейными свойствами на терагерцовых (ТГц) и оптических частотах, активно исследуются с 70-х годов 20 века [1]. Интерес к фонон-поляритонам связан с решением научно-технических задач, таких как спектроскопия, передача данных, обработка информации, применение в медицине, безопасное сканирование и т.д. Электромагнитное поле возбуждает колебания ионов в решетке диэлектрического кристалла в ТГц диапазоне, и электронов в оптическом диапазоне частот. Оптические фононы связываются с фотонами, и распространяться далее в среде как поляритонная волна. Эффективность взаимодействия фотонов и фононов обусловлена соотношением плазменной ионной частоты среды и частоты оптических фононов, которая определяется упругими свойствами кристалла [2]. Поляритонная концепция позволяет изучать структуру кристаллов, в том числе

фотонных кристаллов, на основе теоретических и экспериментальных исследований поляритонных волн в широком спектральном диапазоне от ТГц до ультрафиолетового. Нелинейные свойства поляритонов в диэлектрической среде обусловлены нелинейным откликом на внешнее электромагнитное поле ионов среды в ТГц диапазоне, а электронов в оптическом диапазоне. В зависимости от частоты и поляризации падающей электромагнитной волны в среде возникают потоки поляритонов, представляющие собой пространственные солитоны либо кноидальные волны [3]. Неустойчивость таких волн приводит к возникновению поляритонных потоков в форме рядов либо решеток, т.е. к филаментации потока в поперечной плоскости.

Колебания электронов проводимости металлическом слое или наноструктуре, сформированных в диэлектрическом кристалле, существенно меняют свойства поляритонов [4, 5]. Квазичастицы, возникающие в результате связи плазмонов, фононов и фотонов – плазмон-поляритоны, локализованы и распространяются вдоль поверхностей раздела металла и диэлектрической среды. Локализация плазмон-поляритонов в тонком приповерхностном слое либо в наноструктуре приводит к существенному усилению интенсивности оптического поля. Нелинейные эффекты на границе раздела диэлектрической среды и металла обуславливают возникновение плазмон-поляритонов на второй гармонике падающего электромагнитного импульса [6]. Взаимодействие плазмон-поляритонных импульсов на первой и второй гармониках, которые формируются как светлый и темный солитон, приводит к увеличению длины их распространения. При строгом синхронизме скоростей импульсов формируются солитоны, а при расстройке скоростей возникают кноидальные плазмон-поляритонные волны на первой и второй гармониках, параметры которых определяются свойствами кристалла [7].

#### *Список литературы*

1. Клышко Д.Н. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980.
2. Dzedolik I.V., Pereskokov V. Variation of spectral properties of dielectric ionic crystal in the terahertz range due to the polariton absorption // Appl. Opt. 2014. V.53. P.3318-3327.
3. Dzedolik I.V., Karakchieva O. Nonlinear vector and scalar polariton waves in dielectric medium // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V.30. No.4. P.843–850.
4. Поверхностные поляритоны. М.: Наука, 1985.
5. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009.
6. Dzedolik I.V., Karakchieva O. Transformation of surface plasmon-polariton pulse to the bright and dark solitons at the first and second harmonics // J. Opt. 2013. V.15. P.044019.
7. Dzedolik I.V. Surface plasmon-polariton solitons and cnooidal waves at the boundary of dielectric crystal and metal // J. Opt. 2014. V.16. P.125002.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск*

## **СУБВОЛНОВАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА В ПОЛЕ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ НА ОСНОВЕ ФОТОННОЙ СТРУИ**

В предлагаемом варианте субволновой оптической ловушке в поле стоячей волны минимальный размер области фокусировки определяется не параметрами линзы, а шириной пучка формируемой в режиме «на отражение» фотонной струи. Предложенный подход позволяет стабилизировать положение микрочастицы на известных расстояниях от поверхности в пространстве и значительно повысить точность измерений. Методы оптического управления, основанные на применении фотонных струй, позволяют превзойти дифракционный предел в оптической локации и открывают новые возможности в оптической сортировке.

I.V. MININ, O.V. MININ

*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*

## **SUBWAVELENGTH OPTICAL TWEEZER OF STANDING WAVE BASED ON PHOTONIC JET**

In the proposed version of subwavelength optical trap of standing wave minimum size of the focus area is not determined by the lens parameters, but is determinate by the photonic jet beamwidth formed in the "reflection" mode. The proposed approach allows to stabilize the position of the microparticles at a certain distance from the surface in the space and significantly increase the accuracy of measurements. Optical control methods based on the use of photonic jets allow to overcome the diffraction limit in optical location and open up new possibilities in optical sorting.

Микроманипулирование сверхмалыми объектами – активно развивающееся направление нанофотоники. Функциональные возможности оптических пинцетов во многом определяются пространственной структурой оптических ловушек и степенью фокусировки излучения [1]. Модификация известных принципов построения оптической ловушки в поле стоячей волны [2] заключается в том, что падающее излучение (не сфокусированное) падает на диэлектрическую частицу со специальными свойствами [3], формирующую фотонную струю в режиме на «отражение» [3-5]. Фотонная струя в режиме «на отражение» моделировалась с помощью численного решения уравнений Максвелла при падении плоского волнового фронта излучением с длиной волны 671 нм на диэлектрик SiO<sub>2</sub>

с показателем преломления 1.46. Высота диэлектрической пластины 1 мкм. На рис. 1 показана фотонная струя, сформированная при отражении плоского, не сфокусированного волнового фронта от прямоугольной диэлектрической пластины на плоском отражающем экране: иммерсионной в воздухе (длина фотонной струи 15 длин волн) и в воде. Флуктуации интенсивности поля вдоль распространения излучения означают пучности волны, образованные стоячей волной с периодом, равным половине длины волны в среде. Снижение оптического контраста приводит к уменьшению длины фотонной струи при увеличении максимальной интенсивности поля в струе (в данном случае почти в 3 раза) и к уменьшению размера пучностей вдоль струи.

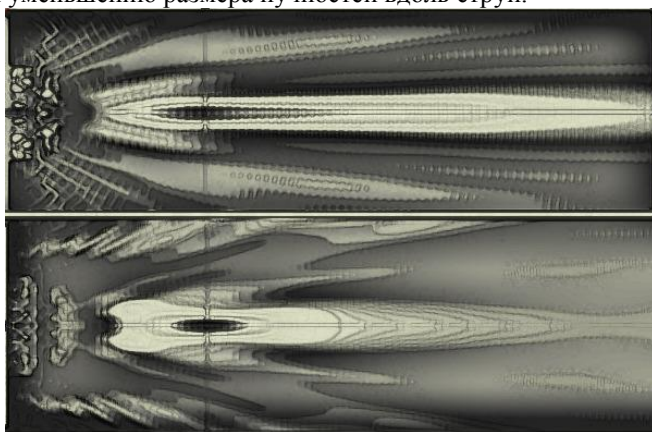


Рис. 1. Формирование фотонной струи, промодулированной пучностями стоячей волны, в режиме «на отражение»: сверху – в воздухе, внизу – в воде

Уменьшение величины перетяжки фотонной струи по сравнению с размером перетяжки линзы приводит и к увеличению плотности энергии в области фокусировки. При этом поворотом отражающего экрана или/и изменением направления падения излучения на отражающий экран достигается пространственное перемещение частицы.

#### *Список литературы*

1. Ashkin A.. US Patent No.370279. H01S 3/06, 3/09. 09.01.1973.
2. Zemanek P., et al. // Opt. Commun. 1998. V.151. P.273-285.
3. Минин И.В., Минин О.В. // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. Т.12..Вып.4. С.59-70.
4. Minin I.V., Minin O.V., et al. // Optics Letters. 2015. V.40. No.10. P.2329.
5. Minin I.V., Minin O.V., Kharitoshin N.A. // Proc. of the 16<sup>th</sup> Int. conf. on micro/nanotechnologies and electron devices (EDM), Novosibirsk, 2015.

**В.А. МАКАРОВ, В.М. ПЕТНИКОВА, В.В. ШУВАЛОВ**  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **АДИАБАТИЧЕСКАЯ МОДУЛЯЦИЯ КНОИДАЛЬНОЙ ВОЛНЫ СОЛИТОНОМ КУЗНЕЦОВА - МА**

В адиабатическом приближении аналитически решена неинтегрируемая задача нелинейного взаимодействия кноидальной волны – «быстрой» компоненты векторного светового поля с локализованным во времени и периодическим в пространстве управляющим сигналом в форме солитона Кузнецова-Ма – «медленной» компонентой того же поля. Определены условия, необходимые для устойчивого распространения полученного решения, промодулированного управляющим сигналом по амплитуде и частоте.

**V.A. MAKAROV, V.M. PETNIKOVA, V.V. SHUVALOV**  
*Lomonosov Moscow State University*

## **ADIABATIC MODULATION OF CNOIDAL WAVE BY KUZNETSOV - MA SOITON**

The problem of nonlinear interaction of a cnoidal wave – a “fast” component of vector light field with localized in time and periodic in space control signal in the form of Kuznetsov-Ma soliton – a “slow” component of the same field is analytically solved in the adiabatic approximation. The conditions which must be fulfilled for stable propagation of the obtained solution with amplitude and frequency modulation are determined.

Нелинейное распространение плоской эллиптически поляризованной световой волны через изотропную нелинейную гиротропную среду описывается неинтегрируемой системой нелинейных уравнений Шредингера [1], актуальной и в других областях физики. С использованием адиабатического приближения ранее были получены приближенные решения этой системы, соответствующие амплитудной и частотной модуляции «быстрой» нелокализованной компоненты поля - кноидальной волны управляющим сигналом - «медленной» компонентой поля с ортогональной поляризацией в форме либо кноидальной волны [1], либо уединенных структур типа светлого [2] или рационального [3] солитонов. Было показано, что если в первом случае приближенное решение постепенно разрушается за счет неполной компенсации дисперсионного расплывания самофокусировкой, то во втором случае

этого не происходит за счет малого времени взаимодействия, заданного шириной солитона.

Рассмотренный в настоящем сообщении управляющий сигнал в форме солитона Кузнецова-Ма [4] также ограничен во времени, но периодически меняется по координате  $z$ . Для него найдено характерное время накопления искажений в приближенном решении и показано, что если это время меньше ширины солитона Кузнецова-Ма, то такое решение устойчиво. Рис. 1 иллюстрирует устойчивую как в пространстве, так и во времени амплитудную  $[a(t, z)]$  и частотную  $[\nu(t, z)]$  модуляцию приближенного решения  $A_{fast}(t, z) = a(t, z)\text{cn}[t\nu(t, z), \mu]$  для быстрой компоненты поля медленным сигналом в форме солитона Кузнецова-Ма. Здесь  $\text{cn}(x, \mu)$  - эллиптический косинус с модулем  $\mu$ .

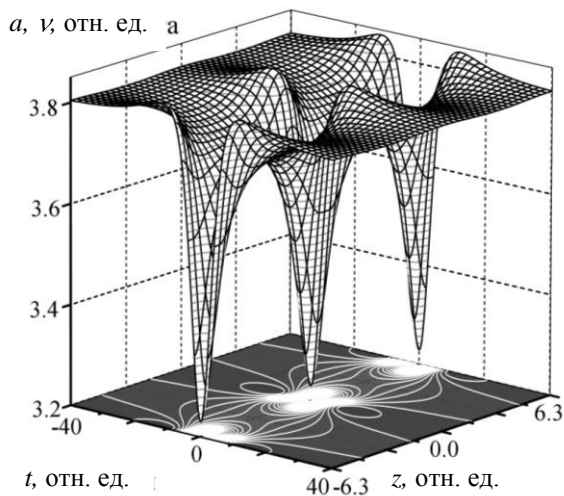


Рис. 1. Устойчивая пространственно-временная модуляция «быстрой» кноидальной волны  $A_{fast} = a(t, z)\text{cn}[t\nu(t, z), \mu]$  «медленным» солитоном Кузнецова – Ма

#### Список литературы

1. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Laser Phys. 2014. V.24(8). P.085405.
2. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Laser Phys. Lett. 2014. V.11(11). P.115402.
3. Makarov V.A., Petnikova V.M., Shuvalov V.V. // Opt. Express. 2014. V.22(22). P.26607.
4. Kibler B., Fatome J., Finot C., Millot G., Genty G., Wetzel B., Akhmediev N., Dias F., Dudley J.M. // Scientific Reports. 2012. No.2. Art.463.

Е.В. КАЗАНЦЕВА<sup>1</sup>, А.И. МАЙМИСТОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## ГЕНЕРАЦИЯ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН ИЗ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НЕСИММЕТРИЧНОМ АНТИНАПРАВЛЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ ВОЛОКОННОМ ОТВЕТВИТЕЛЕ

В модели, описывающей несимметричный антинаправленный нелинейный ответитель, численное моделирование показало, что возможна генерация уединенных волн из непрерывного излучения с постоянной амплитудой, заданного на входе в отрицательно преломляющий канал антинаправленного ответителя. Период формирования уединенных волн уменьшается с увеличением амплитуды входного непрерывного излучения.

E.V. KAZANTSEVA<sup>1</sup>, A.I. MAIMISTOV<sup>1,2</sup><sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

## SOLITARY WAVE GENERATION FROM CONTINUUM IN ASYMMETRIC OPPOSITELY DIRECTED NONLINEAR WAVEGUIDE COUPLER

In a model which describes asymmetric oppositely directed nonlinear coupler it was observed in numerical simulations a phenomenon of solitary wave generation from the input continuous wave set at the entrance of a waveguide with negative refraction. The period of solitary wave formation decreases with increase of the continuum amplitude.

Распространение и взаимодействие связанных волн в несимметричном антинаправленном нелинейном волоконном ответителе описывается системой уравнений для нормированных амплитуд  $e_1$  и  $e_2$  напряженностей электрического поля световой волны [1, 2]:

$$i \left( \frac{\partial}{\partial \zeta} + \frac{\partial}{\partial \tau} \right) e_1 + e_2 + r |e_1|^2 e_1 = 0, \quad i \left( \frac{\partial}{\partial \zeta} - \frac{\partial}{\partial \tau} \right) e_2 - e_1 = 0. \quad (1)$$

В численном моделировании нормированные напряженности электрического поля  $e_1(\tau, \zeta = 0)$  и  $e_2(\tau, \zeta = \zeta_L)$  на входах в каналы

нелинейного волоконного ответвителя, один из которых обладает положительным показателем преломления, а второй - отрицательным, были заданы условиями  $e_1(\tau, \zeta = 0) = 0$ ,  $e_2(\tau, \zeta = \zeta_L) = a$ , где  $a$  - постоянная величина. Длина волоконного ответвителя  $\zeta_L = 40$ , параметр нелинейности  $r = 1$ . При значении  $a = 2$  возникла уединенная волна, распространяющаяся в волноводном ответвителе (см. рис. 1). На рис. 1а показано изменение  $|e_1|$  в волноводе с положительным показателем преломления, а на рис. 1б -  $|e_2|$  в волноводе с отрицательным показателем преломления.

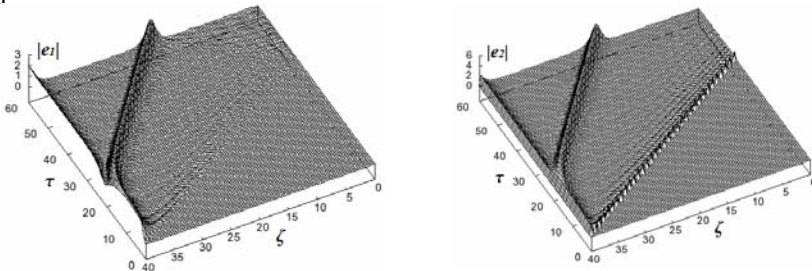


Рис. 1. Формирование уединенной волны из непрерывного излучения с амплитудой  $a = 2$ . Излучение задано при  $\zeta = \zeta_L$  в отрицательно преломляющем канале нелинейного антинаправленного ответвителя

Непрерывное излучение с постоянной амплитудой (превышающей некоторое пороговое значение, уменьшающееся с увеличением параметра нелинейности  $r$ ), заданное на входе в отрицательно преломляющий канал несимметричного волоконного ответвителя, трансформируется (вследствие нелинейной фазовой модуляции) в уединенные волны, распространяющиеся в волоконном ответвителе. Увеличение интенсивности такого излучения приводит к увеличению числа уединенных волн, появляющихся на рассматриваемом временном интервале.

Исследование поддержано грантами РФФИ (грант № 15-02-02764) и РНФ (грант 14-22-00098).

*Список литературы*

1. Kazantseva E.V., Maimistov A.I., Ozhenko S.S. // Phys. Rev. A. 2009. V.80. P.043833.
2. Маймистов А.И., Казанцева Е.В., Оженко С.С. // Известия РАН. Серия физическая. 2011. Т.75. №2. С.180-182.



И.В. РЫЖОВ, Н.А. ВАСИЛЬЕВ, И.С. КОСОВА, С.В. ЩЕРБАКОВ,  
С.М. КОВАЛЁВА, М.Д. ШТАГЕР, В.А. МАЛЫШЕВ<sup>1,2</sup>

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
Санкт-Петербург*

<sup>1</sup>*Университет Гронингена, Нидерланды*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ АНСАМБЛЯ ТРЁХУРОВНЕВЫХ $\Lambda$ -АТОМОВ В ВЫСОКОДОБОТНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ. БИФУРКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ТОЧЕК**

На основании теории бифуркаций стационарных точек теоретически исследованы режимы сверхизлучения ансамбля трехуровневых атомов ( $\Lambda$ -схема операционных переходов) в высокодобротном циклическом резонаторе. Получены зависимости данных режимов от начальной населённости верхнего уровня и величины расщепления нижнего дублета.

I.V. RYZHOV, N.A. VASIL'EV, I.S. KOSOVA, S.V. SHERBAKOV,  
S.M. KOVALEVA, M.D. SHTAGER, V.A. MALYSHEV<sup>1,2</sup>

*The A.I. Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*University of Groningen, The Netherlands*

<sup>2</sup>*Saint Petersburg State University*

## **DYNAMIC REGIMES OF SUPERRADIANCE OF AN ENSEMBLE OF THREE-LEVEL $\Lambda$ -ATOMS IN HIGH Q CAVITY. BIFURCATIONS OF STATIONARY POINTS**

On the basis of the bifurcation theory of stationary points, we theoretically investigate regimes of superradiance of an ensemble of three-level atoms ( $\Lambda$ -scheme of operational transitions) in a high-Q cavity. The dependences of given regimes on the initial population of the upper level and the value of lower doublet splitting are obtained.

Условием существования сверхизлучения (СИ) ансамбля двухуровневых атомов является наличие начальной инверсии населённостей уровней перехода [1, 2]. В случае многоуровневых излучателей, в частности, как рассматриваемых в данной работе трёхуровневых атомов с  $\Lambda$ -схемой операционных переходов, данное ограничение не является обязательным: СИ возможно даже, когда начальная населенность верхнего уровня меньше суммарной

населенности нижнего дублета (СИ без инверсии [3,4]). Подобные системы могут быть реализованы, например, в кристаллах [5,6].

Цель настоящей работы – теоретически исследовать нелинейную динамику СИ ансамбля трёхуровневых  $\Lambda$ -атомов, пространственно однородно и изотропно распределённых в высокодобротном циклическом резонаторе. Данная модель была впервые рассмотрена в работе [2] и затем, более детально, в [3], где было найдено, что трёхуровневое СИ демонстрирует различные динамические режимы (вплоть до хаотического) в зависимости от населённости верхнего уровня и величины расщепления дублета. Была сделана попытка интерпретации найденных режимов, но регулярного исследования проведено не было.

В работе мы используем методы нелинейной динамики для детальной характеристики режимов трёхуровневого СИ. Временная эволюция исследуемой системы рассмотрена в рамках полуклассического подхода. Система считается консервативной (гамильтоновой). Следствием этого является наличие интегралов движения, которые, вместе со специальным выбором начальных условий, позволяют существенно редуцировать размерность фазового пространства модели:  $R^{11} \rightarrow R^5$ . В общем случае, когда дублет расщеплён, получено уравнение для напряженности электрического поля СИ,  $\varepsilon^8 + b_1\varepsilon^6 + b_2\varepsilon^4 + b_3\varepsilon^2 + b_4 = 0$ , где  $b_n$  – константы, зависящие от параметров начальной населённости верхнего уровня  $\alpha$  и расщепления нижнего дублета  $\delta$ , определяющее в фазовом пространстве системы  $R^5$  её стационарные точки и их количество. Явный вид этого уравнения позволил провести двухпараметрическую классификацию этих точек, определить области их существования. Только действительные решения уравнения  $U(\varepsilon) = 0$  имеют физический смысл. Изменение количества решений и их кратность означает изменение числа стационарных точек в фазовом пространстве системы, что существенно влияет на динамику СИ, приводя к бифуркации системы при переходе через определённые критические значения  $\alpha_{cr}$  и  $\delta_{cr}$  (точки вырождения решений полинома). Совокупность таких точек в пространстве  $(\alpha, \delta)$  задаёт линии, разграничивающие области динамических режимов СИ.

#### *Список литературы*

1. Dicke R.H. // Phys. Rev. 1954. V.93. P.99.
2. M.G. Benedict, A.M. Ermolaev, V.A. Malyshev, et al., Super-radiance: Multiatomic Coherent Emission. Bristol and Philadelphia, Institute of Physics Publishing (1996).
3. Malyshev V.A., Ryzhov I.V., Trifonov E.D., Zaitsev A.I. // Las. Phys. 1998. V.8. P.494.
4. Зайцев А.И. и др. // ЖЭТФ. 1999. Т.115. №2. С.505.
5. Башаров А.М. и др. // ЖЭТФ. 2006. Т.129. №2. С.239.
6. Grigoryan G.G., et al. // Las. Phys. 2007. V.17. No.3. P.511.

Е.И. ЛЯШКО<sup>2</sup>, А.И. МАЙМИСТОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный*

## НАПРАВЛЕННЫЕ МОДЫ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ПЛАНАРНОГО ВОЛНОВОДА

Теоретически рассмотрены линейные направленные моды планарного волновода, сердцевина которого представляет собой изотропный диэлектрик, окруженный гиперболической средой. Получены дисперсионные соотношения для ТМ и ТЕ направленных волн. Найдено, что составляющая вектора Пойнтинга в направлении распространения ТМ и ТЕ волн может быть нулевой. Показано, что для каждой ТМ волны существует две частоты отсечки, соответствующие появлению моды в волноводе и ее исчезновению. Похожий эффект наблюдается для ТМ моды в асимметричном волноводе, когда одна из его обкладок является гиперболической средой, а другая – обыкновенным диэлектриком.

E.I. LYASHKO<sup>2</sup>, A.I. MAIMISTOV<sup>1,2</sup><sup>1</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

## GUIDED WAVES IN THE HYPERBOLIC SLAB WAVEGUIDE

Linear guided waves in the slab waveguide were investigated theoretically. The waveguide is consisting of an isotropic dielectric slab bounded by hyperbolic media. The dispersion relations for TE and TM guided modes were obtained. It was found, that for the TM and TE waves Poynting vector component in the wave propagation direction could be equal to zero. It was shown, that every TM mode has two cutoff frequencies, responsible for appearance of the mode in the waveguide and disappearance of it. The similar effect takes place in the asymmetric waveguide, consisting of dielectric substrate and hyperbolic covering layer.

Гиперболическая среда представляет собой сильно анизотропную одноосную среду, главные компоненты тензора диэлектрической проницаемости (или магнитной восприимчивости) которой имеют разные знаки. Поэтому изочастотные поверхности для необыкновенной волны в такой среде представляют собой гиперboloиды: однополостный при  $\varepsilon_o < 0$ ,  $\varepsilon_e > 0$  и двуполостный при  $\varepsilon_o > 0$ ,  $\varepsilon_e < 0$ .

В рассматриваемых планарных волноводах ось анизотропии гиперболических сред предполагается направленной перпендикулярно

направлению распространения связанной моды. В такой геометрии ТЕ волна является обыкновенной, ТМ волна – необыкновенной. При  $\varepsilon_o > 0$ ,  $\varepsilon_e < 0$  для ТМ волны не существует условий, приводящих к полному отражению от границы с гиперболической средой, а уравнения распространения ТЕ волны ничем не отличаются от аналогичных для полностью диэлектрического волновода. При  $\varepsilon_o < 0$ ,  $\varepsilon_e > 0$  полное отражение ТЕ волны от границы диэлектрика с гиперболической средой происходит при любых углах падения, а полное отражение ТМ волны возможно при углах падения  $\alpha < \alpha_0$ ,  $\alpha_0$  – критическое значение угла падения. Это условие приводит к возникновению второй частоты отсечки для ТМ моды.

В случае симметричного планарного волновода, подложка и покровный слой которого представляют собой гиперболические среды, эффективный показатель преломления ТЕ моды изменяется в пределах  $0 \leq n_{eff}^{TE} < n_i$ , показатель преломления ТМ моды принадлежит отрезку  $0 \leq n_{eff}^{TM} < n_e$ . Здесь  $n_i$ ,  $n_e$  – показатели преломления сердцевины волновода и необыкновенной волны в гиперболической среде. В случае асимметричного волновода, подложка которого представляет собой изотропный диэлектрик, а покровный слой – гиперболическую среду распространение ТМ волны возможно в узком диапазоне углов падения на границы раздела:  $\alpha_{ПВО} < \alpha < \alpha_0$ , при этом показатель преломления моды отвечает неравенствам  $n_1 \leq n_{eff}^{TM} < n_e$ ,  $n_1$  – показатель преломления подложки. На рис. 1 представлены дисперсионные кривые, отражающие зависимость нормированного эффективного показателя преломления  $b$  от нормированной толщины (частоты) волновода  $V$ .

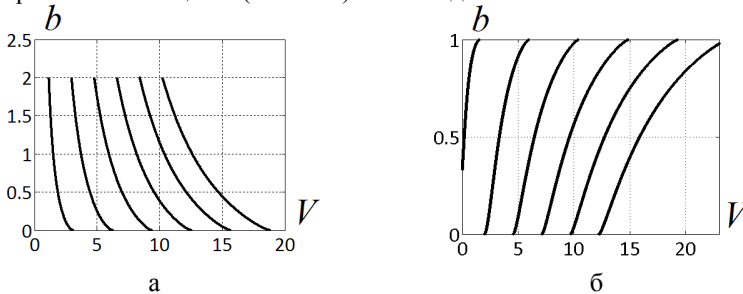


Рис. 1. Дисперсионные кривые для ТМ волны в гиперболическом волноводе: симметричный волновод (а), асимметричный волновод (б)

Н.И. БУРИМОВ, А.О. ЗЛОБИН, А.А. ШМИДТ, С.М. ШАНДАРОВ,  
В.В. ШЕПЕЛЕВИЧ<sup>1</sup>, А.В. МАКАРЕВИЧ<sup>1</sup>, Ю.Ф. КАРГИН<sup>2</sup>

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

<sup>1</sup>*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,  
Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

## **ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВКЛАД В ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ОТКЛИК ПРИ ПОПУТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕТОВЫХ ВОЛН В КРИСТАЛЛАХ СИЛЛЕНИТОВ**

Исследовано попутное взаимодействие сильной стационарной волны накачки с фазово-модулированной сигнальной волной на фоторефрактивных голограммах, формируемых за счет диффузионного механизма в кристаллах силленитов, с учетом совместного вклада в нелинейный отклик обратного флексоэлектрического и фотоупругого эффектов.

N.I. BURIMOV, A.O. ZLOBIN, A.A. SHMIDT, S.M. SHANDAROV,  
V.V. SHEPELEVICH<sup>1</sup>, A.V. MAKAREVICH<sup>1</sup>, Yu.F. KARGIN<sup>2</sup>

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

<sup>1</sup>*I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University, Belarus*

<sup>2</sup>*Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow*

## **FLEXOELECTRIC CONTRIBUTION TO THE PHOTOREFRACTIVE RESPONSE FOR CODIRECTIONAL INTERACTION OF LIGHT WAVES IN SILLENITE CRYSTALS**

A codirectional interaction of a strong stationary pump wave with a phase-modulated signal wave on the photorefractive holograms formed by diffusion in the sillenite crystals with taking into account the combined contribution to the nonlinear response from the converse flexoelectric effect and photoelastic one was investigated.

Вклад обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик был обнаружен в кристалле титаната висмута среза (100) при исследовании эффекта фазовой демодуляции для встречного взаимодействия сильной стационарной волны накачки со слабой фазово-модулированной сигнальной волной [1].

В настоящем сообщении представлены результаты анализа фазовой демодуляции, принимающего во внимание флексоэлектрический вклад,

при попутном двухволновом взаимодействии света на пропускающих фоторефрактивных голограммах в кристаллах класса силленитов.

Использование методики, развитой в работах [1, 2], позволило получить выражения для глубины модуляции интенсивности в выходном сигнале голографического интерферометра, использующего пропускающие фоторефрактивные решетки в кристаллах силленитов среза (110), при различных состояниях поляризации взаимодействующих на них световых волн. Характерной особенностью полученных соотношений при одинаковых состояниях поляризации на входной грани образца (циркулярной или линейной) является отличие от нуля сигнала фазовой демодуляции на частоте первой гармоники модулирующего сигнала только при учете флексоэлектрического вклада в возмущения оптических свойств среды фоторефрактивной голограммой.

Экспериментально эффект фазовой демодуляции при попутном взаимодействии волн линейной поляризации исследовался в кристалле силиката висмута среза (110) с толщиной  $d = 2,64$  мм на длине волны 633 нм. Экспериментальная установка позволяла изменять ориентацию вектора фоторефрактивной решетки и векторов поляризации взаимодействующих волн относительно осей кристалла, а также задавать значения ее пространственного периода  $\Lambda$  в пределах от 0,6 до 1,2 мкм. При ориентации вектора решетки вдоль направления [001] максимальные значения относительных амплитуд глубины модуляции интенсивности сигнального пучка на первой и второй гармониках частоты модуляции составили, соответственно,  $M^{(1)} = 0,015$  и  $M^{(2)} = 0,011$  для  $\Lambda = 0,6$  мкм и  $M^{(1)} = 0,009$  и  $M^{(2)} = 0,025$  для  $\Lambda = 1,17$  мкм.

Наличие сигнала демодуляции на первой гармонике, возрастающего с уменьшением  $\Lambda$ , свидетельствует о существовании флексоэлектрического вклада в фоторефрактивный отклик в кристалле силиката висмута.

Работа выполнена в рамках задания Минобрнауки РФ на 2015 год и НИР по проектной части госзадания № 3.878.2014/ИК.

#### *Список литературы*

1. Шандаров С.М., Шамаков С.С., Буримов Н.И., Сюеваева О.С., Каргин Ю.Ф., Петров В.М. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т.95. Вып.12. С.699–702.

2. Shandarov S.M., Kolegov A.A., Burimov N.I., Bykov V.I., Petrov V.M., Kargin Yu.F. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam // Phys. Wave Phenomena. 2009. V.17. No.1. P.39–44.

**Е.В. ВАСИЛЬЕВ, С.А. ШЛЕНОВ**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **ЧАСТОТНО-УГЛОВЫЕ СПЕКТРЫ ОПТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ С ФАЗОВОЙ ДИСЛОКАЦИЕЙ ПРИ САМОВОЗДЕЙСТВИИ В ПЛАВЛЕНОМ КВАРЦЕ**

Численно исследована динамика частотно-угловых спектров фемтосекундного излучения на длине волны 800 нм в кольцевом пучке с фазовой сингулярностью при его распространении в плавленом кварце в режиме самовоздействия. Выполнена количественная оценка трансформации энергии импульса в стоксову и антистоксову области спектра.

**E.V. VASILYEV, S.A. SHLENOV**

*Lomonosov Moscow State University*

## **FREQUENCY-ANGULAR SPECTRA OF OPTICAL FIELDS WITH PHASE DISLOCATION UPON SELF-ACTION IN FUSED SILICA**

Dynamics of the frequency-angular spectra of femtosecond pulses at a wavelength of 800 nm in a circular beam with a phase singularity propagating in fused silica under self-action conditions is analyzed numerically. The quantitative evaluation of the transformation of the pulse energy to the Stokes and Anti-Stokes wings of the spectrum was obtained.

В настоящее время частотно-угловые спектры фемтосекундного излучения ближнего ИК диапазона в нелинейных средах исследованы, в основном, для пучков без дислокации фазы [1]. При филаментации пучков с фазовой сингулярностью проанализированы характеристики возникающего суперконтинуума. Показано, что в процессе генерации суперконтинуума форма кольцевого пучка практически не меняется и при возникновении малого числа филаментов излучение суперконтинуума от них может интерферировать [2]. В [3] экспериментально измерены ширины полос суперконтинуума в газе. Стабильность распространения пучков с оптическими вихрями исследовалась в [4], было показано, что инерционность плазмообразования приводит к квазисолитонному режиму распространения, устойчивого к разрушающим симметрию возмущениям.

Данная работа посвящена анализу частотно-угловых спектров импульса при самовоздействии кольцевого пучка с фазовой сингулярностью в плавленом кварце на длине волны 800 нм.

Математическая модель – система нелинейных дифференциальных уравнений для медленно меняющейся амплитуды светового поля  $A(r, \tau, z)$  и концентрации свободных носителей заряда  $N_e(r, \tau, z)$ :

$$\begin{cases} 2ik_0 \frac{\partial A}{\partial z} = \hat{T}^{-1}[\Delta_{\perp} A] + \hat{D}[A] + \frac{2k_0^2}{n_0} (\Delta n_k - \Delta n_{pl}) A - ik_0 (\sigma N_e + \alpha + \delta) A, \\ \frac{\partial N_e}{\partial \tau} = R_E(N_0 - N_e) + N_e(v_i - \beta). \end{cases}$$

В ней учтены такие эффекты, как: дифракция, дисперсия, керровская и плазменная нелинейности, обратное тормозное поглощение, потери на фотоионизацию, экстинкция, волновая нестационарность, а также лавинная ионизация и рекомбинация.

Результаты численного моделирования показали, что при самовоздействии кольцевого пучка с фазовой сингулярностью уширение частотно-углового спектра в стоксову область происходит больше, чем в антистоксову. При этом из-за сингулярности фазы в угловом спектре отсутствует нулевая пространственная гармоника (рис. 1а). Полосы по угловой координате на рис. 1а. являются следствием интерференции от формируемых в нелинейной среде филаментов. Трансформация энергии из области центральной частоты в стоксову и антистоксову выше, чем у кольцевого пучка без фазовой сингулярности и гауссова пучка (рис. 1б).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-52-00183.

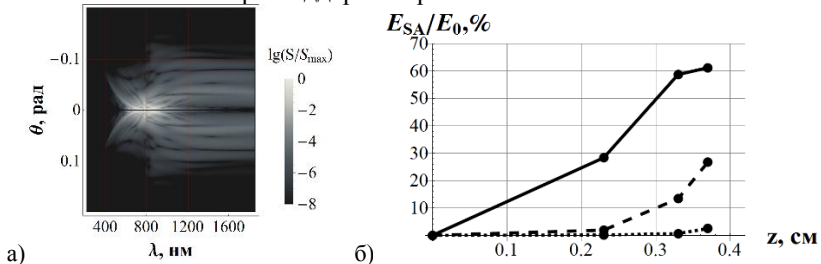


Рис. 1. Частотно-углового спектр  $S$  на расстоянии  $z=0.33$  см (а) и доля энергии в стоксовом и антистоксовом крыльях спектра (б) в импульсе с фазовой сингулярностью на оси кольцевого пучка (топологический заряд  $m=2$ , пиковая мощность  $P=10P_{cr}$ ), для сравнения – результаты по преобразованию энергии в гауссовом пучке (точки) и кольцевом пучке без фазовой сингулярности (пунктир)

#### Список литературы

1. Кандидов В.П., Шленов С.А., Косарева О.Г. // Квант. электр. 2009. Т.39. №3. С.205.
2. Neshev D.N., Dreischuh A., Maleshkov G., et.al. // Opt. Express. 2010. V.18. No.17. P.18368.
3. Hansinger P., Dreischuh A., Paulus G.G. // Appl. Phys B. 2011. V.104.
4. Khasanov O., Smirnova T., Fedotova O., et.al. // Appl. Optics. 2012. V.51. No.10. P.198.



А.А. АКИМОВ, Е.В. ВОРОБЬЕВА, В.В. ИВАХНИК  
*Самарский государственный университет*

**ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ШЕСТИВОЛНОВОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ  
НЕЛИНЕЙНОСТИ В СХЕМЕ С ПОПУТНЫМИ ВОЛНАМИ  
НАКАЧКИ**

Рассмотрено влияние на пространственную селективность шестиволнового преобразователя излучения толщины нелинейной среды, коэффициента поглощения, частот взаимодействующих волн и угла между волнами накачки. Построена временная зависимость ширины полосы пространственных частот объектной волны при разных значениях толщины нелинейной среды.

A.A. AKIMOV, E.V. VOROB'eva, V.V. IVAKHNIK  
*Samara State University*

**SPATIAL AND TIME CHARACTERISTICS OF A SIX-WAVE  
RADIATION CONVERTER ON THERMAL NONLINEARITY  
IN THE SCHEME WITH CODIRECTIONAL PUMPING WAVES**

The influence of thickness of the nonlinear medium, absorption coefficient, frequencies of the interacting waves and the angle between pumping waves on spatial selectivity of a six-wave radiation converter has been considered. The time dependence of bandwidth of spatial frequencies for different values of thickness of the nonlinear medium has been constructed.

Для получения волны с обращенным волновым фронтом (ОВФ) наряду с четырехволновыми процессами часто используются процессы шестиволнового взаимодействия [1]. Переход от четырех- к шестиволновому взаимодействию расширяет возможности управления параметрами волны с ОВФ, позволяет получить волну с удвоенной обращенной фазой, что может быть предпочтительнее при коррекции фазовых искажений, обработки оптических полей [2-4].

В настоящей работе исследовалась пространственная селективность шестиволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности в схеме с попутными волнами накачки.

Шестиволновое взаимодействие описывалось с помощью скалярного волнового уравнения и уравнения Пуассона. Использовалось

приближение заданного поля по плоским волнам накачки, условие малого коэффициента отражения, параксиальное приближение. Учитывалась интерференция сигнальной волны с первой волной накачки.

Зависимость модуля амплитуды пространственного спектра объектной волны от пространственной частоты имеет один максимум, положение которого совпадает с пространственной частотой второй волны накачки.

Анализ качества ОВФ объектной волны проводился численными методами при условии распространения сигнальной волны от точечного источника, расположенного на передней грани нелинейной среды. Критерием качества ОВФ выступает ширина полосы пространственных частот объектной волны ( $\Delta\kappa_6$ ). На качество ОВФ оказывают влияние толщина нелинейного слоя ( $\ell$ ), коэффициент поглощения, частоты взаимодействующих волн и угол между волнами накачки.

Ширина полосы пространственных частот объектной волны обратно пропорциональна толщине нелинейного слоя. С ростом коэффициента поглощения наблюдается монотонное увеличение ширины полосы пространственного спектра. При увеличении угла между волнами накачки в пределах области параксиальности наблюдается уменьшение ширины полосы пространственных частот, что свидетельствует об ухудшении качества ОВФ. При значениях  $\ell \leq \frac{k_{1,2}}{(\Delta\kappa_6)^2}$  на пространственную селективность шестиволнового преобразователя излучения существенное влияние начинает оказывать изменение волновых чисел волн накачки ( $k_{1,2}$ ).

Была построена временная зависимость ширины полосы пространственных частот объектной волны при различных значениях толщины нелинейной среды. С течением времени наблюдалось монотонное уменьшение ширины полосы пространственных частот с выходом на постоянное значение.

#### *Список литературы*

1. Zhang Y., Khadka U., Anderson B., Xiao M. Temporal and spatial interference between four-wave mixing and six-wave mixing channels // Physical review letters. 2009. V.102. P.013601.
2. Ивахник В.В., Никонов В.И., Савельев М.В. Удвоенное обращение волнового фронта при шестиволновом взаимодействии на тепловой нелинейности // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т.18. №1. С.13-17.
3. Ивахник В.В., Никонов В.И. Удвоенное сопряжение волнового фронта с преобразованием частоты при невырожденном шестифотонном взаимодействии // Оптика и спектроскопия. 1993. Т.75. №2. С.390–391.
4. Ормачев О., Толстик А.Л. Формирование нелинейных динамических голограмм в чистых органических жидкостях // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т.71. №1. С.131.

В.В. ИВАХНИК, М.В. САВЕЛЬЕВ  
*Самарский государственный университет*

## **ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПРОЗРАЧНОЙ НАНОЖИДКОСТИ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛН НАКАЧКИ**

Проанализированы пространственные характеристики четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учетом электрострикции и эффекта Дюфура. Показано, что ширина пространственного спектра волны, отраженной таким преобразователем, уменьшается с увеличением угла поворота и расходимости волны накачки.

V.V. IVAKHNIK, M.V. SAVELYEV  
*Samara State University*

## **FOUR-WAVE MIXING IN A TRANSPARENT NANOLIQUID WITH ALLOWANCE FOR SPATIAL STRUCTURE OF THE PUMP WAVES**

Spatial characteristics of the four-wave radiation converter in a transparent medium with regard for the electrostriction and Dufour effect has been analyzed. Shown that the spatial spectrum width of the wave reflected by such a converter decreases with increasing rotation angle and divergence of the pump wave.

Знание точности преобразования излучения четырехволновыми преобразователями определяет их применимость в системах адаптивной оптики для коррекции фазовых искажений в реальном масштабе времени. Существенное влияние на точность преобразования излучения может оказывать пространственная структура волн накачки [1].

В работах [2, 3] исследованы пространственные спектры и временные характеристики четырехволновых преобразователей в двухкомпонентных средах с учетом явления электрострикции в схеме со встречными плоскими волнами накачки. Настоящая работа посвящена изучению пространственных характеристик четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной наножидкости с учетом пространственной структуры волн накачки. С учетом поворота волн накачки получены аналитические выражения, описывающие связь пространственного спектра отраженной преобразователем волны со спектром падающей волны для двух плоских волн накачки, одной плоской волны накачки и

волны накачки, пространственный спектр которой изменяется по гауссову закону. Установлена связь пространственных спектров падающей и отраженной волн при изменении пространственных спектров волн накачки случайным образом. В качестве случайного распределения рассмотрены функции взаимной корреляции пространственных спектров волн накачки в виде дельта-функции и гауссова распределения.

Показано, что поворот плоских волн накачки приводит не только к смещению полосы пространственных частот, вырезаемых четырехволновым преобразователем, на величину поворота, но и уменьшению ширины пространственного спектра отраженной волны. Такое уменьшение ширины спектра связано с увеличением волновой расстройки с ростом угла поворота волны накачки. Сходная зависимость наблюдается для квазивырожденного четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной двухкомпонентной среде при увеличении отклонения от единицы отношения волновых чисел волн накачки [3]. Анализ показывает, что с ростом угла поворота волны накачки ширина пространственного спектра меняется по закону обратно пропорциональному углу поворота.

В отсутствии поворота волн накачки рост расходимости одной из них приводит к смещению максимума пространственного спектра в область низких пространственных частот. Получена зависимость ширины пространственного спектра отраженной четырехволновым преобразователем волны от расходимости волны накачки

$$\frac{\Delta k}{k} = \alpha \left( \frac{\kappa_0}{k} \right)^{-1} + \beta .$$

Здесь  $\Delta k$  - ширина пространственного спектра,  $\kappa_0$  - параметр, характеризующий расходимость волны накачки,  $\alpha$  и  $\beta$  - параметры, зависящие от произведения волнового числа  $k$  на толщину нелинейного слоя. При фиксированном значении расходимости волны накачки зависимость ширины пространственного спектра от угла поворота волны накачки хорошо аппроксимируется гауссовым законом.

#### *Список литературы*

1. Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырехволновом взаимодействии. Самара: Самарский университет, 2010.
2. Ivakhnik V.V., Savelyev M.V. Four-wave mixing in a transparent medium based on electrostriction and Dufour effect at large reflectance // Physics Procedia. 2015. V.73. P.26-32.
3. Ивахник В.В., Савельев М.В. Пространственно-временные характеристики квазивырожденного четырехволнового преобразователя излучения в прозрачной среде с учётом электрострикции и эффекта Дюфура // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №4. С.486.

А.А. УШКОВ, А.А. ЩЕРБАКОВ

*Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный*

## **ИЗОЧАСТОТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ В ТРЕХМЕРНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСКУССТВЕННЫХ СРЕДАХ**

В работе изучается анизотропия оптических свойств в трехмерных периодических диэлектрических композитах. Применен эффективный численный метод, принадлежащий к классу методов в обратном пространстве. Получены изочастотные поверхности материалов в граничном режиме работы, когда отношение длины волны к периоду структуры близко к единице, а также характерные деформации этих поверхностей.

A.A. USHKOV, A.A. SHCHERBAKOV

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

## **ISOFREQUENCY SURFACES IN 3D-PERIODIC ARTIFICIAL DIELECTRIC MEDIA**

In this paper we investigate the anisotropy of optical properties of three-dimensional periodic dielectric composites. An effective numerical method in frequency domain is applied. We obtain isofrequency surfaces of the material in critical regime with the period/wavelength ratio close to unity, and typical deformations are received.

Искусственные диэлектрические композиты с периодическим изменением параметров перспективны для создания на их основе целого ряда оптических устройств [1-2].

Для исследования оптических свойств композитов выработаны разнообразные подходы [3-4], где предлагается описывать структуру в рамках теории эффективной среды (ТЭС). ТЭС приближает реальную структуру однородной анизотропной средой с рассчитываемым тензором  $\hat{\epsilon}$ , определяемым только решеткой Браве и элементарной ячейкой кристалла. Например, теория Максвелла-Гарнетта (ТМГ) заменяет материал изотропной диэлектрической средой. На рис. 1 показан пример расчета коэффициента преломления структуры, состоящей из периодических диэлектрических шариков в воздухе: точное моделирование (волнистая поверхность) и предсказание по ТМГ

(плоскость). Эта теория дает количественную погрешность в оценке коэффициента преломления всего 1,5%.

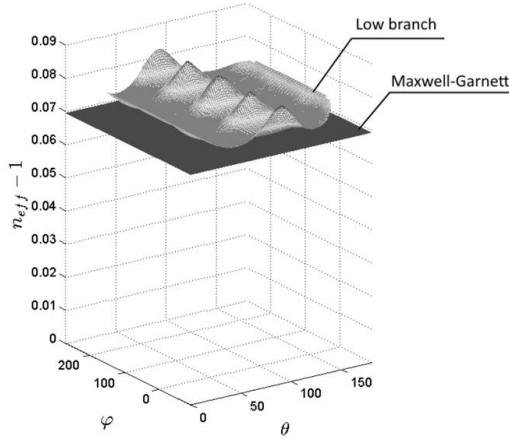


Рис. 1. Сравнение численного расчета с предсказанием по ТМГ

Приближение ТЭС перестает работать для граничного случая, когда отношение длины волны излучения к периоду структуры  $p_0 = p / \lambda$  близко к единице [3]. Это связано с тем, что френелевские изочастотные поверхности второго порядка искривляются, и при дальнейшем уменьшении длины волны распадаются на части.

В данной работе численно исследован пограничный режим работы трехмерных диэлектрических композитов, когда  $p_0 \approx 1$ , а также характерные искажения и деформации изочастотных поверхностей.

#### Список литературы

1. Mekis A., Chen J.C., Kurland I., Fan S., Villeneuve P.R., Joannopoulos J.D. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides // Physical Review Letters. 1996. V.77. P.3787-3790.
2. Turner M.D., Saba M., Zhang Q., Cumming B.P., Schroder-Turk G.E., Gu M. Miniature chiral beamsplitter based on gyroid photonic crystals // Nature Photonics. 2013 V.7. P.801-805.
3. Markel V.A., Schotland J.C. Homogenization of Maxwell's equations in periodic composites: boundary effects and dispersion relations // Physical Review E. 2012. V.85. P.066603(23).
4. Smith D.R., Pendry J.B. Homogenization of metamaterials by field averaging (invited paper) // Journal of the Optical Society of America B. 2005. V.23. P.391-403.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

<sup>1</sup>*Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ**

Теоретически рассмотрено формирование резонансных пространственных наноструктур в конденсированных средах при взаимодействии лазерного излучения нетрадиционной поляризации в рамках универсальной поляритонной модели. Рассмотрение проиллюстрировано экспериментальными примерами на средах с существенно различными физическими свойствами. Показано, почему радиально поляризованное излучение наиболее эффективно для лазерной обработки материалов.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

<sup>1</sup>*Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the NRNU MEPhI,  
Ulyanovsk region*

## **INTERACTION OF VECTOR BEAMS OF LASER RADIATION WITH CONDENSED MEDIA**

The formation of spatial resonant nanogratings under the interaction of nontraditionally polarized laser radiation with condensed matter is theoretically considered in framework of universal polariton model. The consideration is illustrated by experimental examples and condensed media having different physical properties. It is shown why radially polarized laser radiation is highly efficient for materials treatment.

Универсальная поляритонная модель лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред разработана для линейно поляризованного излучения. Требуется обосновать ее применимость для нетрадиционной поляризации [1]. Рассмотрим нормальное падение лазерного излучения на границу раздела сред, одна из которых является поверхностно-активной. Согласно теоретическим представлениям, направление распространения поверхностных поляритонов (ПП) задается направлением вектора напряженности электрического поля лазерного

излучения. Исходя из этого и в силу симметрии задачи, радиально поляризованное излучение будет формировать на рассматриваемой границе раздела микроструктуру в виде резонансной кольцевой дифракционной решетки рельефа (или диэлектрической проницаемости) с пространственным периодом  $d_0 = \lambda / \eta$ , где  $\eta$  - действительная часть показателя преломления рассматриваемой границы раздела для ПП.

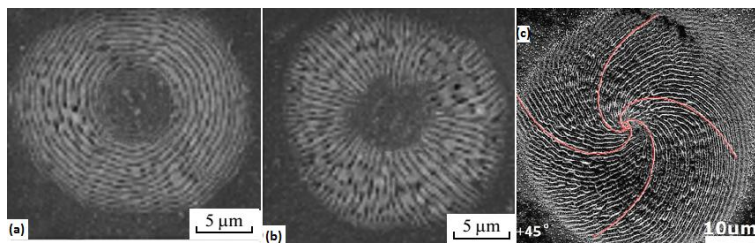


Рис. 1. Формирование резонансных наноструктур на поверхностях кремния (а) и (б) [2] и нержавеющей стали (в) [3] под действием излучения фемтосекундной длительности радиально (а), азимутально (б), промежуточно поляризованного ( $\varphi = 45^\circ$ ) (в)

Экспериментальная реализация формирования кольцевой решетки структур ( $d_0 = \lambda / \eta$ ) поверхности кремния [2] показана на рис. 1а ( $\lambda = 800$  нм,  $\tau = 35$  фс). При действии азимутально поляризованного излучения соображения аксиальной симметрии и локального направления вектора  $\mathbf{E}$  показывают, что должны формироваться микроструктуры в виде исходящих из центра радиальных лучей, что согласуется с экспериментом на кремнии, см. рис. 1б [2]. Увеличение плотности энергии лазерного излучения приводит к увеличению числа формируемых лучей. Использование s-пластинки для преобразования линейной поляризации и получение промежуточной (смешанной) поляризации излучения ( $\varphi = 45^\circ$ ) позволяет сформировать более сложную картину резонансных структур на нержавеющей стали, закручивающихся в виде спиралей, см. рис. 1в [3]. Формируемая кольцевая решетка является фокусирующей линзой для возбуждаемых ПП, переносящих энергию к центру зоны облучения, что приводит к увеличению эффективности обработки конденсированных сред радиально поляризованным излучением.

#### Список литературы

1. Макин В.С., Макин Р.С. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т.115. №1. С.151-155.
2. Lou K. et al. // Optics Express. 2012. V.20. No.1. P.120-127.
3. Quyang J. et al. // Optics Express. 2015. V.23. No.10. P.125662.



А.А. КОРОННОВ<sup>1</sup>, А.Е. САФУТИН<sup>1</sup>, М.М. ЗЕМЛЯНОВ<sup>1</sup>,  
А.В. МАМИН<sup>1</sup>, Г.М. ЗВЕРЕВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «НИИ «ПОЛЮС» им. М.Ф. Стельмаха», Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

## **МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ГЕРМАНИЕВОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА ВСЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

В работе представлены результаты численных расчетов движения границы плавления в объеме германиевого лавинного фотодиода при возрастании мощности воздействия лазерного импульса. Показано, что ухудшение характеристик фотодиода на начальных стадиях деградации вызвано дефектообразованием в области пространственного заряда.

A.A. KORONNOV<sup>1</sup>, A.E. SAFUTIN<sup>1</sup>, M.M. ZEMLYANOV<sup>1</sup>,  
A.V. MAMIN<sup>1</sup>, G.M. ZVEREV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC "POLYUS Research Institute of M.F. Stelmah", Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

## **THE DAMAGE MECHANISM OF GERMANIUM AVALANCHE PHOTODIODE AS A RESULT OF HIGH POWER LASER IRRADIATION INFLUENCE**

The results of numerical computation of melting boundary movement in volume of germanium avalanche photodiode at increasing power of laser-pulse influence are presented. It is shown, that the characteristics degradation of photodiode at degradation initial stage is initiated by defect formation in space-charge region.

На сегодняшний день в импульсных фотоприемных устройствах, наиболее широко применяются фотодиоды на основе соединений  $A_3B_5$ , и германиевые лавинные фотодиоды. Несмотря на то, что фотоприемные устройства на базе германиевых лавинных фотодиодов уступают по чувствительности фотоприемным устройствам реализованных с применением InGaAs лавинных и p-i-n фотодиодных структур, их стойкость к лазерному излучению существенно выше [1]. Исследования германиевых лавинных фотодиодов на начальных стадиях деградации показали, что при увеличении мощности воздействия наблюдается

немонотонное изменение шума фотодиода и коэффициента лавинного умножения в разрушенной области.

Наиболее вероятной причиной таких изменений является продвижение границы плавления материала через  $p-n$  переход. Для рассмотрения процесса разрушения фотодиода было проведено численное решение уравнения теплопроводности для случая нагрева германия лазерным излучением с длиной волны  $\lambda=1,064$  при длительности импульса 4 нс. В результате были рассчитаны значения глубин, на которых достигаются температуры испарения и плавления материала (рис 1). Из рисунка 1 видно, что в диапазоне мощностей воздействия 100 – 150 Вт (соответствующих плотностям мощности  $1,57 \cdot 10^8$  –  $2,36 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) граница плавления продвигается от 1 до 2 мкм, где для фотодиодов с малой глубиной залегания  $p-n$  перехода сосредоточена область пространственного заряда, и следовательно, при этих мощностях будет более явно наблюдаться ухудшение характеристик, что нашло экспериментальное подтверждение. При дальнейшем увеличении мощности свыше 200 Вт будет происходить дефектообразование в области  $p-n$  перехода, в том числе вследствие увеличения глубины кратера. Полученные результаты позволяют объяснить нелинейность изменения характеристик фотодиода от мощности воздействия, а также сформулировать требования, предъявляемые к глубине залегания  $p-n$  перехода, для повышения стойкости фотодиодов к воздействию лазерного излучения.

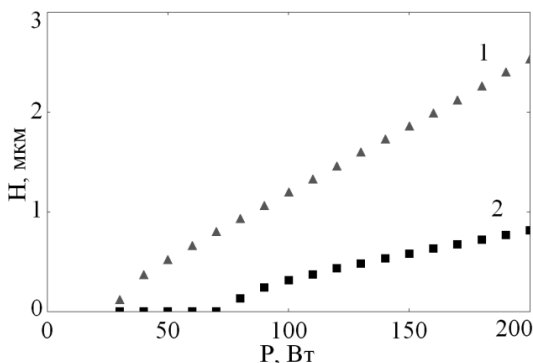


Рис. 1. Движение границы плавления (1) и испарения материала (2) с увеличением мощности воздействующего импульса лазерного излучения

*Список литературы*

1. Короннов А.А., Зверев Г.М., Землянов М.М., Жарикова Е.В., Марсагишвили Д.В. // Прикладная физика. 2015. №4. С.54-58.

**Н.В. МАСАЛЬСКИЙ**

*Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва*

## **ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖИДКИХ РАСТВОРОВ АММИАКА**

Обсуждается оптический метод определения концентрации жидких растворов аммиака на основе гетеродинной волноводной структуры «кремний на изоляторе». Приводятся экспериментальные результаты апробации метода.

**N.V. MASALSKY**

*Scientific Research Institute of System Researches of the RAS, Moscow*

## **OPTICAL METHOD FOR CONTROL OF LIQUID AMMONIA CONCENTRATION**

The optical method for control of concentration of liquid ammonia solutions on the basis of the heterodyne waveguide structure "silicon on an insulator" is discussed. The experimental results of approbation of a method are given.

В настоящее время отмечается большой интерес к оптическим методам детектирования жидких и газообразных веществ, особенно вредных и опасных для человека, например, аммиака. Одним из перспективных направлений реализации этих методов является тонкопленочная технология КНИ (кремний на изоляторе), в частности, применение волноводных структур в качестве сенсорного элемента, принцип действия которого рассмотрен в [1], а его функциональная схема приведена на рис. 1 слева.

Для обеспечения высоких метрологических характеристик в отличие от подхода рассмотренного в [1], в данном случае используется широкоапертурная гетерогенная волноводная структура, схема которой приведена на рис. 1 справа. Высоколегированные  $n^+$  и  $p^+$  области призваны подавить моды высших порядков, неизбежно возникающие в широкоапертурных волноводах, что влечет резкий рост паразитных потерь. Апертура высоколегированной  $n^+$  области равна половине апертуры нелегированной области  $W_0$ , апертура  $p^+$  области примерно равна  $W_0/4$ . Такая чередующаяся конструкция обеспечивает высокий уровень модовой селекции, подавление переизлучения через боковую грань волновода, общую электронейтральности волноводной структуры.

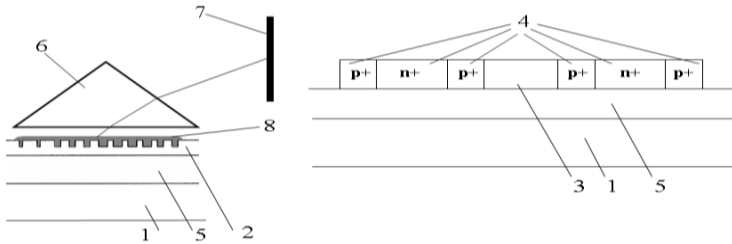


Рис. 1. Схема КНИ сенсорной ячейки (слева), схема КНИ гетерогенной волноводной структуры (справа), где 1 – кремниевая подложка, 2 – гетерогенный кремниевый оптический волновод с дифракционной решеткой, 3- нелегированная область, 4 – высоколегированная область, 5 – погруженный слой окиси кремния, 6 - призма, 7 – линейка фотоприемников, 8 – жидкий раствор аммиака

Выбор и оптимизация топологии волноводной КНИ структуры с решетчатым элементом подробно рассмотрена в [1]. Для структуры с толщинами: волновода - 210 нм, погруженного окисла - 940 нм, апертурами:  $W_0$  - 10.2 мкм, n+ и p+ областей – 5.1 мкм и 2.6 мкм, соответственно, уровнем легирования n+ и p+ областей -  $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , с минимальной шириной канавки 22 нм и глубиной 100 нм на длине волны 1550 нм максимальная эффективность вывода равна 76%.

На рис. 2 приведены экспериментальные характеристики сенсора.

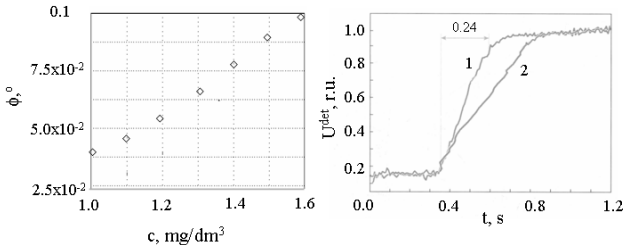


Рис. 2. Экспериментальные характеристики: зависимость углового положения пика интенсивности от логарифма предельно низких концентраций аммиака (слева); временной отклик сенсора при разных концентрациях, где 1- большая, среднее время отклика 0.24 с, 2 – низкая, среднее время отклика 0.44 с (справа)

#### Список литературы

1. Масальский Н.В. Метод селективного детектирования веществ на основе волноводной структуре «кремний на изоляторе // Сб. научных трудов IV Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.114-115.

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, А.А. ЧИСТЯКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ЛАЗЕРНАЯ ДЕСОРБЦИЯ СЛЕДОВЫХ КОЛИЧЕСТВ СЛАБОЛЕТУЧИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

Проведено сравнение различных лазерных источников на основе Nd<sup>3+</sup>:YAG, с наносекундной длительностью импульсов ( $\lambda=266, 354, 532$  нм), для исследования возможности создания бесконтактного устройства отбора пробы. Представлены результаты масс-спектрометрического исследования лазерной десорбции нитроароматических соединений и нитроаминов с различных подложек. Рассмотрены реализующиеся механизмы взаимодействия лазерного излучения с молекулами исследуемых нитросоединений. Показано, что лазер на основе Nd<sup>3+</sup>:YAG с длиной волны  $\lambda=266$  нм, длительностью импульса 5-10 нс, интенсивностью  $10^7$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> является наиболее эффективным источником для создания бесконтактного устройства отбора пробы основанного на десорбции взрывчатых веществ с различных поверхностей.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, A.A. CHISTYAKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **LASER DESORPTION OF TRACES OF EXPLOSIVES WITH LOW VAPOR PRESSURE**

Comparison of desorption effectiveness of Nd<sup>3+</sup>:YAG nanosecond laser sources ( $\lambda=266, 354, 532$  nm) has been carried out to investigate a possibility of creating a non-contact sampling device for detectors of explosives. Results of mass-spectrometric study of laser desorption of nitroamine and nitroaromatic compounds from a different substrates are presented. Mechanisms of interaction of laser radiation with nitro-compounds are discussed. It is shown that Nd<sup>3+</sup>: YAG laser with wavelength  $\lambda=266$  nm, pulse duration 5-10 ns, intensity  $10^7$ - $10^9$  W/cm<sup>2</sup> is the most effective source for creation a non-contact sampling device based on desorption of explosives from surfaces.

В настоящее время востребованной и актуальной задачей является разработка бесконтактных лазерных методов отбора пробы для обнаружения следов взрывчатых веществ (ВВ) с низким давлением насыщенных паров. В работе исследуется возможность создания эффективного пробоотборного устройства на основе метода лазерной десорбции следовых количеств ВВ.

Для оценки эффективности различных лазерных источников при иницировании десорбции следовых количеств ВВ с различных

поверхностей при атмосферном давлении была разработана методика, основанная на масс-спектрометрическом анализе результатов воздействия лазерного излучения на тест-образцы. Тест-образцы представляют собой подложки из различных материалов (кварцевого стекла, алюминиевой пластинки, бумаги и полиэтилена) диаметром 5 мм со следами тринитротолуола, гексогена, пентаэритриттетранитрата или октогена на поверхности в количестве  $10^{-5}$  г, высаженной из раствора в ацетонитриле. При воздействии излучения на тест-образцы происходит сбор продуктов десорбции на шток модуля прямого ввода пробы масс-спектрометра с последующим введением его в масс-спектрометр, испарением сорбированных продуктов в процессе термопрограммируемой десорбции и количественным и качественным масс-спектрометрическим анализом.

Определены оптимальные параметры лазерного излучения, обеспечивающие максимальную эффективность десорбции ВВ с поверхностей обследуемых объектов в виде частиц и комплексов, по которым возможна однозначная идентификация конкретного ВВ: лазер на основе  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  с длиной волны  $\lambda=266$  нм, длительностью импульса 5-10 нс, интенсивностью  $10^7$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

Общая масса десорбированных молекул при атмосферном давлении, с использованием оптимального режима лазерного излучения, для всех веществ составила 100-8000 нг за 100 лазерных импульсов (10 секунд), что значительно превышает порог чувствительности современных портативных детекторов на основе спектрометрии ионной подвижности и спектрометрии приращения ионной подвижности. При сравнении с результатами десорбции нитросоединений одиночными лазерными импульсами в условия вакуума (0,01-15 нг за один лазерный импульс) можно заметить, что использование частотного режима существенно повысило эффективность десорбции ВВ. Количество десорбированного вещества возросло более чем на 2 порядка, несмотря на то, что количество импульсов возросло лишь в 100 раз. Вероятно, эффективность десорбции возрастает за счёт прогрева поверхности подложки, приводящий к десорбции вещества даже в промежутки между лазерными импульсами.

Обсуждаются фотофизические процессы, приводящие к диссоциации молекул ВВ при инициировании лазерной десорбции, что может затруднять идентификацию ВВ при анализе воздушных проб детекторами на основе дрейф-спектрометрии ионов.

**А.В. ВЕДЯШКИНА, И.Н. ПАВЛОВ, Б.С. РИНКЕВИЧЮС**  
*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНЫХ  
КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД ПО ПОЛОЖЕНИЮ  
КАУСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Исследованы условия возникновения каустик при продольном зондировании стратифицированных оптически неоднородных сред структурированными лазерными пучками. Регистрируемые геометрические параметры каустик используются для решения обратной задачи рефракции в целях восстановления физических параметров среды, обуславливающих неоднородность показателя преломления. Рассматриваются два вида оптических неоднородностей: диффузионный слой жидкости и температурное поле около охлажденного тела в жидкости.

**A.V. VEDYASHKINA, I.N. PAVLOV, B.S. RINKEVICHYUS**  
*National Research University «MPEI», Moscow*

**DETERMINATION OF INHOMOGENEOUS CONDENSED  
MEDIA PARAMETERS BY LOCATION  
OF LASER RADIATION CAUSTICS**

Conditions of caustic emergence by structured laser beams longitudinal sensing of stratified optically inhomogeneous media are considered in this work. Recorded caustics' geometric parameters are used to solve the inverse problem of refraction in order to reconstruct of the media physical parameters, causing to inhomogeneity of the refractive index. Two types of optical inhomogeneities are considered: diffusion layer of liquid and temperature field near the cooled body in a liquid.

При применении лазерных методов для определения физических характеристик среды, обуславливающих неоднородность показателя преломления, в условиях сильной рефракции для зондирования целесообразно использовать структурированные лазерные пучки (СЛП) [1]. Один из способов решения обратной задачи рефракции основан на регистрации положения особых точек каустик [2, 3]. В работе показаны условия образования каустик в диффузионном слое жидкостей, возникающем на границе раздела двух сред с различными показателями преломления. На рис. 1 представлены экспериментальные рефрактограммы при продольном зондировании плоским лазерным

пучком диффузионного слоя жидкости (показатель преломления более плотной жидкости  $n_1 = 1,3381$  и менее плотной –  $n_2 = 1,3311$ ).

Используя оригинальный алгоритм обработки рефрактограмм, можно выделить две каустики. Распределение показателя преломления или толщину слоя можно получить путем сравнения положения, формы каустик и координаты их слияния с теоретически рассчитанными. Регистрация рефрактограмм в различные моменты времени позволяет оценить зависимость толщины слоя от времени.

Следующий тип неоднородности, рассмотренный в работе, – температурное поле около охлажденного шара в воде. Для проведения бесконтактного контроля теплофизических характеристик процесса целесообразно использовать эмпирические зависимости положения особых точек каустик от температуры поверхности. Например, при зондировании пограничного слоя горизонтальным элементом СЛП, дистанция  $z$ , где располагается «клюв» каустики (рис. 2) определяется разностью температуры поверхности и жидкости. Эмпирические кривые построены для трех разных значений температуры воды (рис. 3).

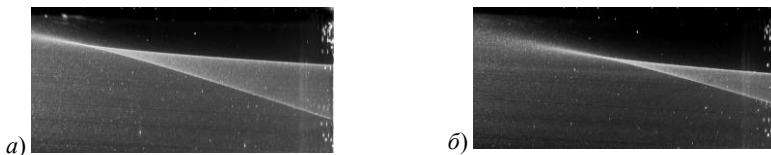


Рис. 1. Экспериментальные рефрактограммы распространения плоского лазерного пучка в диффузионном слое в различные моменты времени: 0 мин (а), 30 мин (б)

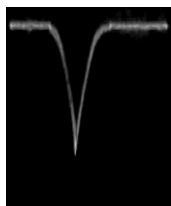


Рис. 2. «Клюв» каустики

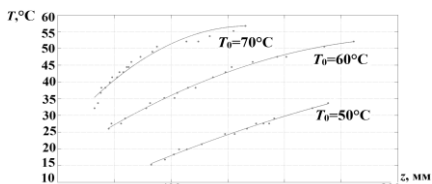


Рис. 3. Эмпирические зависимости положения особой точки каустики от температуры поверхности

#### Список литературы

1. Rinkevichyus B.S., Raskovskaya I.L., Tolkachev A.V., Vedyashkina A.V. Structured laser radiation in optical inhomogeneous media refractography // PERS Proceedings. Prague, 2015. P.2660-2664.
2. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. 3D-visualization of caustics' formation in laser refractography problems // Physics Procedia. 2015. V.73. P.205-210.
3. Raskovskaya I.L. Specific imaging of caustics upon refraction of structured laser radiation in stratified media // Technical Physics. 2015. V.60(6). P.911–916.



Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ, С.А. КОЛЕСНИКОВ<sup>1</sup>,  
Е.С. КОЛЕСНИКОВА<sup>1</sup>, Ю.А. ТУРУТИН<sup>2</sup>

*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва*

*<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва*

*<sup>2</sup>ООО «Экохимия-Экотоксиметрия», Москва*

## **ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЙ АБСОРБЦИОННЫЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО- ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ**

В работе описывается новый метод абсорбционного анализа, основанный на выделении с помощью интерференционно-поляризационного фильтра характерных для анализируемого вещества фурье-компонент спектра поглощения.

Yu.V. PISAREVSKY, S.A. KOLESNIKOV<sup>1</sup>,  
E.S. KOLESNIKOVA<sup>1</sup>, Yu.A. TURUTIN<sup>2</sup>

*Shubnikov Institute of Crystallography of the RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Semenov Institute of Chemical Physics of the RAS, Moscow*

*<sup>2</sup>Ecochemistry-Ecotoximetry Ltd, Moscow*

## **INTERFEROMETRIC ABSORPTION ANALYSIS BASED INTERFERENCE-POLARIZING FILTER**

The paper describes a new method of absorption analysis, based on the allocation of specific Fourier components of the absorption spectrum of the analyte by means of an interference-polarization filter.

Оптический абсорбционный метод является наиболее универсальным и простым среди других инструментальных методов аналитической химии. Однако оптико-абсорбционные анализаторы с классической схемой выделения характерных для измеряемого компонента спектральных участков из-за недостаточно высокой чувствительности для решения ряда задач, например, для мониторинга атмосферы жилой зоны могут применяться только в трассовом исполнении.

Использование интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ) является новым направлением в абсорбционном анализе [1, 2]. Новизна подхода заключается в том, что спектр поглощения аналита представляется как результат суммирования гармоник (преобразование Фурье). Введение ИПФ в состав абсорбционного анализатора с широкополосным источником излучения позволяет рассматривать

поглощенный световой поток как функцию разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей (интерферограмму поглощения). Осциллирующая составляющая интерферограммы, если не учитывать дисперсию разности хода, является фурье-образом спектра поглощения. Таким образом, использование ИПФ в качестве интерферометра позволяет выделять фурье-компоненты спектра поглощения, обеспечивающие измерение с максимальной чувствительностью.

Выигрыш в чувствительности (более двух порядков) за счет использования ИПФ проиллюстрирован на примере анализатора диоксида азота ( $\text{NO}_2$ ). Метрологические характеристики опытного экземпляра прибора со светодиодом на кристалле InGaN (доминирующая  $\lambda = 440$  нм) и измерительной кюветой 30 см исследовались в ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева». Результаты исследований показали, что пороговая чувствительность анализатора соответствует расчетной величине 0.001 ppm, диапазон измерений составляет 0 - 100 ppm.

Селективность интерферометрического абсорбционного метода определяется перекрытием осцилляций в интерферограммах поглощения аналита и мешающего компонента. Специфическая особенность ИПФ – дисперсия разности хода интерферирующих лучей позволяет изменять степень перекрытия осцилляций, и, тем самым, влиять на селективность измерений. Важно, что такой способ улучшения селективности практически не отражается на чувствительности измерений. На примере измерения бензола ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) в присутствии толуола ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ) приведен расчет дисперсии разности хода для составной фазовой пластины, при которой влияние толуола на точность измерения бензола должно быть минимальным. Приведены результаты исследований селективности опытного экземпляра анализатора  $\text{C}_6\text{H}_6$  (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), подтверждающие результаты расчета.

В настоящее время технология абсорбционного анализа с применением ИПФ разработана и опробована для измерения ряда газовых компонентов: оксида и диоксида азота, диоксида серы, сероводорода, хлора, аммиака, формальдегида, фенола, бензола, толуола, йода. По совокупности основных метрологических характеристик интерферометрические анализаторы превосходят существующие оптико-абсорбционные приборы аналогичного назначения.

#### *Список литературы*

1. Колесников С.А., Колесникова Е.С., Писаревский Ю.В., Турутин Ю.А. // Кристаллография. 2011. Т.56. №1. С.56-60.
2. Колесников С.А., Колесникова Е.С., Писаревский Ю.В., Турутин Ю.А. // Кристаллография. 2013. Т.58. №6. С.891-895.

И.С. СИДОРОВ<sup>1</sup>, М.А. ВОЛЫНСКИЙ<sup>1</sup>, О.В. МАМОНТОВ<sup>1,2</sup>,  
А.А. КАМШИЛИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Северо-западный федеральный медицинский исследовательский центр  
им. В.А. Алмазова, Санкт-Петербург*

## **ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГРАВИТАЦИИ НА ЛИЦЕВОЕ КРОВΟΣНАБЖЕНИЕ МЕТОДОМ ДВУМЕРНОЙ ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ**

В работе приведены результаты исследования воздействия гравитации на лицевое кровоснабжение при помощи двумерной фотоплетизмографии.

I.S. SIDOROV<sup>1</sup>, M.A. VOLYNSKY<sup>1</sup>, O.V. MAMONTOV<sup>1,2</sup>,  
A.A. KAMSHILIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*ITMO University, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup>*V.A. Almazov North-West Federal Medical Research Centre, Saint-Petersburg*

## **STUDY OF GRAVITATION INFLUENCE ON FACIAL BLOOD PERFUSION BY IMAGING PHOTOPLETHYSMOGRAPHY**

This paper presents the research results of the gravitation influence on the facial blood perfusion by means of imaging photoplethysmography.

Автономная регуляция кровообращения контролирует быстрые изменения сосудистого тонуса. Зачастую особенности нейрогенной регуляции приводят к функциональным системным и локальным изменениям кровотока. Удобным инструментом для изучения деятельности периферической части кровеносной системы является метод визуализации пульсаций крови на основе двумерной фотоплетизмографии (ФПГ) [1]. Данный метод позволяет получать информацию о распределении амплитуды и фазы пульсаций крови одновременно на различных участках тела. Недавно было показано, что серьезные различия в амплитуде или фазе ФПГ-сигналов, полученных от левой и правой сторон лица, могут быть использованы в качестве биомаркеров для диагностики такого заболевания, как мигрень [2].

В настоящей работе при помощи системы визуализации пульсаций крови проведено исследование воздействия гравитации на лицевое кровоснабжение. В ходе данного исследования были записаны двумерные

фотоплетизмограммы лиц субъектов как в сидячем, так и в лежачем положении. На основе этих фотоплетизмограмм были составлены карты распределения фазы ФПГ-сигналов, которая показывает относительную задержку пульсаций крови в разных областях тела. Распределения фазы пульсаций в разных положениях одного из субъектов (сидя, лежа на левом и правом боку) представлены на рис. 1.

Предварительные экспериментальные данные, полученные при обследовании здоровых добровольцев, показывают, что гравитация оказывает значительное влияние на лицевое кровоснабжение. Практически для всех субъектов в положении лежа наблюдалась значительная положительная разность фаз между верхней и нижней половинами лица. В некоторых случаях значение асимметрии превышало 180 градусов. При этом в каждом конкретном случае степень асимметрии для положения на левом и правом боку различалась: у одних субъектов асимметрия проявлялась сильнее в одном положении, у других — в другом. Кроме того, стоит отметить, что средняя разность фаз в положении сидя во всех случаях была близка к нулю.



Рис. 1. Распределение фазы пульсаций крови на лице человека сидящего (а), лежащего на правом боку (б) и лежащего на левом боку (в)

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что гравитация оказывает воздействие на кровоток в сосудах мелкого калибра, влияя на фазу пульсаций крови в них. Однако, степень этого влияния индивидуальна для каждого человека и, по всей вероятности, зависит от состояния нейрогенной регуляции сосудов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 15-15-20012).

#### *Список литературы*

1. Kamshilin A.A., Miridonov S., Teplov V., Saarenheimo R., Nippolainen E., Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution // Biomed. Opt. Express. 2011. V.2. P.996-1006.
2. Zaproudina N., Teplov V., Nippolainen E., Lipponen J.A., Kamshilin A.A., Närhi M., Karjalainen P.A., Giniatullin R. Asynchronicity of facial blood perfusion in migraine // PLOS ONE 2013. 8. e80189.

Н.М. ВЕРЕНИКИНА, М.С. КОВАЛЕВ, Е.С. КОЛОСОВА  
*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГЛАЗА В РАСШИРЕННОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН**

Разработан неинвазивный и экспрессный метод для бесконтактного измерения спектральной чувствительности глаза в видимом и инфракрасном диапазоне.

N.M. VERENIKINA, M.S. KOVALEV, E.S. KOLOSOVA  
*Bauman Moscow State Technical University*

## **CONTACTLESS MEASURING SPECTRAL SENSITIVITY OF EYE IN THE EXTENDED RANGE WAVELENGTHS**

Developed noninvasive and express method for non-contact measuring of spectral sensitivity of eye in the extended range wavelength.

Расположение, физиологическая структура и чувствительность поверхности глаза являются предрасполагающими факторами для ежедневного контакта с различными потенциально опасными условиями окружающей среды и вредными веществами [1].

Оценка спектральной чувствительности глаза – важная процедура для диагностики работы глаз человека в целом. В настоящее время эта проблема решается либо субъективными колориметрическими методами, либо инвазивным способом [2]. Принимая во внимание потенциально вредный характер многих материалов и веществ, возникает необходимость разработки бесконтактного метода оценки спектральной чувствительности в расширенном диапазоне длин волн для оценки опасности данных веществ после их воздействия на органы зрения.

В настоящее время нет ни одного метода одновременной проверки зрения человека в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

В настоящей работе предложен неинвазивный и экспрессный метод определения спектральной ширины чувствительности сетчатки глаза человека и оценка чувствительности видимой области спектра и остаточной – в инфракрасной области света.

Суть метода заключается в следующем: широкополосным источником света зондируется макулярная область сетчатки глаза, на которой

формируются интерференционные полосы. Определяя число пульсирующих полос определенного цвета  $N_i$ , рассчитываем спектральную ширину по формуле [2]:

$$\Delta\lambda_i = \frac{\lambda_i}{N_i},$$

где  $\lambda_i$  - длина волны, соответствующая максимальной чувствительности для определенного цвета.

Схема реализации предлагаемого способа представлено на рис. 1, где: 1-широкополосный светодиод; 2-коллиматор; 3-два поляроида; 4,6-плоскопараллельные пластины интерферометра Жамена; 5-оптический клин; 7-поворотная призма Дове; 8-объектив;9-поворотное зеркало;10-исследуемый глаз.

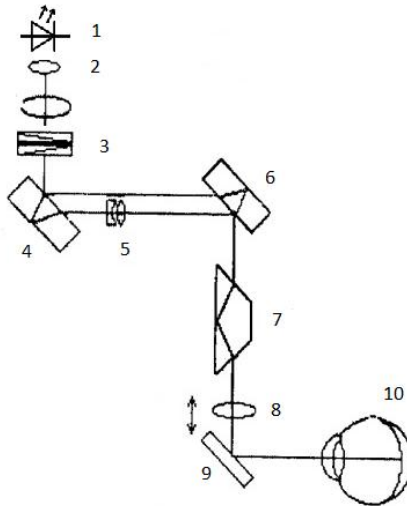


Рис. 1. Схема реализации метода

*Список литературы*

1. Wilhelmus K.R. The Draize eye test // Surv. Ophthalmol. 2001.V.45. P.493–515.
2. Шамшинова А.М., Волков В.В. Функциональные методы исследования в офтальмологии. М.: Медицина, 1999.

Н.В. АНДРЕЕВА, Т.Б. КУЗЬМИНА, О.В. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА В ПРОЯВЛЕННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОМАТЕРИАЛАХ**

Проведено исследование характеристик водных частиц серебра, полученных суспензий, путём специальных методов проявления высокоразрешающих галогенидосеребряных фотоматериалов. Показано, что при практически одинаковых спектрах ослабления распределение частиц по размерам может значительно различаться.

N.V. ANDREEVA, T.B. KUZMINA, O.V. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint-Petersburg*

## **RESEARCH OF PLASMON RESONANCE IN DEVELOPED HOLOGRAPHIC PHOTOMATERIALS**

Research of characteristics of aqueous particles of silver that were developed by special methods of developing high-resolution silver-halide photomaterials was carried out. It was shown that at almost identical ranges of decrease distribution of particles by sizes can differ considerably.

Огромный интерес к оптике металлических наночастиц, возникший в последние десятилетия, связан с развитием нанотехнологий и нанодиагностики. Этот интерес поддерживает быстро развивающееся научное направление, получившее название «Наноплазмоника» [1], или «Плазмоника» [2]. Плазмоника объединяет исследование оптических явлений в нанометровом масштабе, сопровождающих взаимодействие света с металлами.

Объемные голограммы на плазмонных частицах серебра представляют собой фотоиндуцированные периодические структуры, которые демонстрируют практическое использование плазмонного резонанса металлических наночастиц.

Актуальность работы обусловлена тем, что объемные голограммы на плазмонных частицах серебра представляют собой фотоиндуцированные периодические структуры, которые демонстрируют практическое использование плазмонного резонанса металлических наночастиц. Результаты исследований таких структур могут быть использованы при

создании новых материальных оптических сред, обладающих функциональными свойствами, которые превосходят возможности традиционных материалов и элементов оптических приборов и систем.

Целью данной работы является оценка параметров ансамбля проявленных частиц серебра в объемных голограммах, зарегистрированных на галогенидосеребряных фотоматериалах. Для того чтобы исследовать свойства отдельной частицы были изготовлены водные препараты исследуемых образцов: проявленные фотоматериалы на стеклянной подложке и пористом стекле. Затем была проведена проверка стабильности изготовленных суспензий с течением времени для проведения дальнейших экспериментов и оценены спектральные характеристики и распределение частиц по размерам в суспензиях в стабильном состоянии. После этого был проведён анализ данных и сравнение результатов, полученных для различных образцов.

Измерения спектров поглощения проводились на спектрофотометре Evolution 300 на интервале длин волн 300-800 нм. Оценка распределения частиц по размерам проводилась на приборе Horiba LB-550 в интервале от 0 до 6 мкм.

Образцы AgПС представляют собой измельченные образцы пористого стекла, растворенные в водном растворе КОН. Образцы AgФП представляют собой водный раствор снятого с поверхности фотопластинки регистрирующего слоя.

Были проведены серии экспериментов, в результате которых получены зависимости спектров поглощения и распределение частиц по размерам водных суспензий пористого стекла и фотопластинок. Эксперименты с образцами водных суспензий проводились для AgПС через 24 дня, для AgФП через 8 дней и через 28 дней. По данному сравнению можно сказать, что в видимой области спектра мы имеем небольшую разницу максимумов спектров, когда как идет большая разница между размерами частиц в выбранных суспензиях. Т.о. показано, что при разнице примерно в 6 раз по размерам частиц было обнаружено небольшое отклонение максимумов спектров, что означает, что в данной области оценка частиц по размерам предпочтительнее спектрального распределения.

#### *Список литературы*

1. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2010.
2. Новотный Л., Хехт Б. Основы нанооптики. М.: Физматлит. 2009.



И.Н. ПАВЛОВ, Б.С. РИНКЕВИЧЮС, А.В. ТОЛКАЧЕВ,  
А.В. ВЕДЯШКИНА

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА  
ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАЗМОННОГО РЕЗОНАНСА  
ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ  
В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ ЖИДКОСТИ**

Показана возможность применения метода поверхностного плазмонного резонанса для визуализации и количественной диагностики процессов испарения, охлаждения, нагревания, кристаллизации, перемешивания в пристеночном слое прозрачных жидкостей. Исследовано влияние параметров эксперимента на чувствительность метода по показателю преломления и диапазон измерений.

I.N. PAVLOV, B.S. RINKEVICHYUS, A.V. TOLKACHEV,  
A.V. VEDYASHKINA

*National Research University «MPEI», Moscow*

**INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF SURFACE PLASMON  
RESONANCE METHOD FOR VISUALIZATION OF PROCESSES  
IN NEAR-WALL LIQUID LAYER**

The possibility of application surface plasmon resonance method for visualization and quantitative diagnostics of evaporation, cooling, heating, crystallization, mixing processes in near-wall liquid layer is shown. The influence of experimental parameters on sensitivity to refractive index and measuring range were investigated.

Явление поверхностного плазмонного резонанса привлекло внимание исследователей во второй половине XX в. [1, 2]. Оно состоит в том, что при определенных условиях интенсивность отраженного от границы раздела двух сред света близка к нулевой, несмотря на то, что угол падения света при этом больше критического угла полного внутреннего отражения. Так как это резонансный эффект, то даже при небольшом отклонении одного из параметров (например, показателя преломления второй среды) этот эффект исчезает и появляется отраженный свет. Для наблюдения этого эффекта необходимо наличие тонкой металлической пленки наноразмерной толщины на границе раздела сред. На рис. 1 показаны расчетные зависимости коэффициента отражения света от угла падения для разных значений толщины золотой пленки [3].

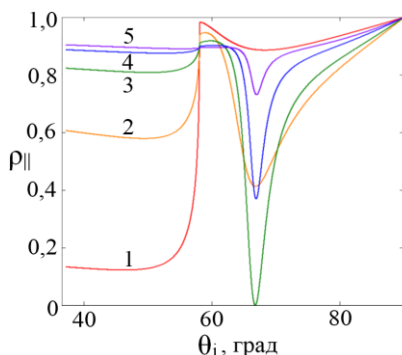


Рис. 1. Зависимости коэффициента отражения света от угла падения на границу раздела стекла и воды при наличии тонкой пленки золота между ними для разных значений толщины пленки: 1 – 10 нм; 2 – 30 нм; 3 – 50 нм; 4 – 70 нм; 5 – 90 нм

Из рис. 1 видно, что существует определенный резонансный угол, при котором коэффициент отражения минимален. Значение этого угла зависит от показателя преломления второй среды (в данном случае – воды). И даже при незначительном изменении этого показателя преломления будет наблюдаться существенное изменение интенсивности отраженного света. Поэтому если исследуется процесс, в котором показатель преломления жидкости зависит только от одного параметра (например, температуры или концентрации), то, во-первых, существует возможность визуализации динамики протекания этого процесса с помощью указанного явления, а во-вторых, можно измерить распределение показателя преломления в тонком пристеночном слое и определить распределение температуры или концентрации. К таким процессам относятся испарение, охлаждение, нагревание, кристаллизация, перемешивание капель жидкости. Ранее они были подробно исследованы авторами с помощью метода нарушенного полного внутреннего отражения.

#### *Список литературы*

1. Otto A. Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total internal reflection // Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei. 1968. V.216. No.4. P.398-410.
2. Kretschmann E. Die bestimmung optischer konstanten von metallen durch anregung von oberflächenplasmaschwingungen // Zeitschrift für Physik. 1971. V.241. No.4. P.313-324.
3. Павлов И.Н., Ринкевичус Б.С., Тарасов А.Е., Толкачев А.В. Перспективы использования метода поверхностного плазмонного резонанса для исследования процессов в пристеночном слое жидкости // Оптические методы исследования потоков: Сб. тр. XIII Межд. науч.-технич. конф. М.: НИУ «МЭИ», 2015. С. 4-6.

В.И. БУСУРИН, В.В. КОРОБКОВ, Ф.А. ТУАН

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

Исследован микрооптоэлектромеханический (МОЭМ) преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), который имеет квазилинейную функцию преобразования, позволяет уменьшить требуемое напряжение возбуждения и исключить возможность электрического пробоя. Разработан способ для обеспечения возможности расширения диапазона измерения угловой скорости и исследована динамическая характеристика такого преобразователя.

V.I. BUSURIN, V.V. KOROBKOV, PHAM ANH TUAN

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MICROOPTO-ELECTROMECHANICAL ANGULAR VELOCITY TRANSDUCER**

Optical micro-electromechanical (MOEM) angular velocity transducer based on optical tunneling effect (OTE), which has quasi-linear transfer function, allowing to reduce the required excitation voltage and to avoid the possibility of electric discharge is researched. Method providing the possibility of expanding the measurement range is developed and dynamic characteristic of this transducer is researched.

Для уменьшения диапазона требуемых перемещений при измерении угловой скорости  $\Omega_z$ , что приводит к уменьшению напряжению возбуждения  $U_{\text{возб}}$ , и исключения возможности электрического пробоя, предлагается использовать схему МОЭМ–преобразователя угловых скоростей с высокочувствительной оптоэлектронной схемой съема информации, например, на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [1]. Такой преобразователь содержит источник излучения (ИИ), призмы полного внутреннего отражения, фотоприемник (ФП), чувствительный элемент (ЧЭ) в виде вибрационной балки на основе пьезоматериала ЦТС-19, работающий при возбуждении переменным напряжением  $U_{\text{возб}}$  частотой  $\omega$  и использующий эффект Кориолиса для

преобразования угловой скорости в перемещение (рис. 1). Отклонение конца ЧЭ с дополнительной массой  $m$  относительно оси  $OY$  под действием угловой скорости  $\Omega_Z$  будет являться функцией многих параметров [2]:  $y_m = f(\Omega_Z, E, \rho, d_{обр}, l, h, b, U_{возб}, \omega, m)$ , где:  $E, \rho$  – модуль упругости и плотность пьезокерамики;  $d_{обр}$  – пьезомодуль обратного пьезоэффекта;  $l, h, b$  – длина, толщина и ширина ЧЭ соответственно.

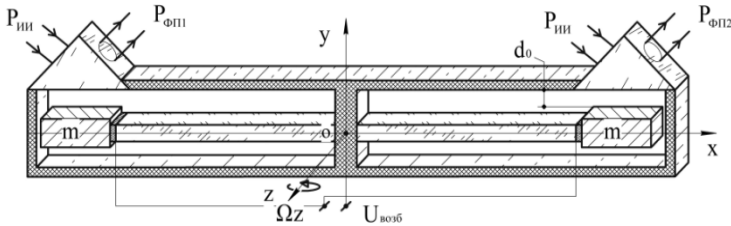


Рис. 1. МОЭМ-преобразователь угловых скоростей на основе ОТЭ

Функция преобразования МОЭМ-преобразователей представляет собой зависимость выходного напряжения  $U_{вых} = f(\Omega_Z)$  от воздействия угловой скорости  $\Omega_Z$  на ЧЭ и определяется, в основном, зависимостью отражательной способности  $R[d(\Omega_Z)]$  границы раздела сред «призма – воздух – ЧЭ» от величины зазора  $d(\Omega_Z)$  между основанием призмы и ЧЭ.

Для обеспечения расширения диапазона измерения угловой скорости, в качестве прокладок, фиксирующих зазор, используются пьезоактуаторы, на которые подается управляющее напряжение  $U_{упр}(\Omega_Z)$  по цепи обратной связи (ОС). Введение отрицательной ОС с динамическим управлением рабочим зазором позволяет существенно расширить диапазон измерения.

Разработана модель преобразователя угловых скоростей с ОС. Определена передаточная функция и выполнено моделирование динамических характеристик преобразователя. Проведен расчет переходных процессов при использовании кремниевого фотодиода в качестве приемника оптического излучения.

Предлагаемый преобразователь имеет квазилинейную функцию преобразования в заданном диапазоне измерения ( $\pm 4$ рад/с) и обеспечивает возможность работы с высоким быстродействием.

#### Список литературы

1. Бусурин В.И., Горшков Б.Г., Коробков В.В. Волоконно–оптические информационно–измерительные системы. Москва: Изд-во МАИ, 2012.
2. Бусурин В.И., Казарьян А.В., Фам Ань Туан Исследование характеристик микроптоэлектромеханического преобразователя угловых скоростей // Вестник Московского авиационного института. 2015. №1. С.29–37.

В.В. КОРОБКОВ, Н.Т. ЛВИН  
 Московский авиационный институт  
 (национальный исследовательский университет)

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

Для качественной работы системы управления самолета важно иметь информацию об ускорении. Для измерения ускорений в широком диапазоне температур предлагается использовать преобразователи внешних воздействий на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), выполненные из кварцевого стекла. В работе приведена методика расчета преобразователя ускорений на основе ОТЭ.

V.V. KOROBKOV, NAING HTOO LWIN  
 Moscow Aviation Institute (National Research University)

## METHOD OF CALCULATION OF ACCELERATION TRANSDUCER BASED ON OPTICAL TUNNELING EFFECT

Need to obtain information about acceleration for quality process of aircraft control system. To measure acceleration in the wide range of temperatures is suggested to use transducers with external impact based on the optical tunnel effect (OTE) made of quartz. In this work method calculation of acceleration transducer based on optical tunneling effect is described.

Структура преобразователя на основе ОТЭ, представленного на рис. 1, содержит источник излучения (ИИ), первичный преобразователь (ПП), фотоприемник (ФП), и блок обработки (БО).

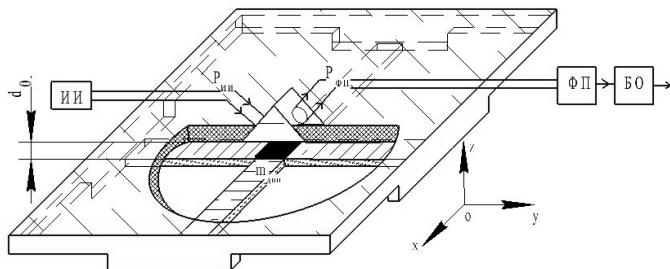


Рис. 1. Преобразователь ускорений на основе ОТЭ

Первичный преобразователь состоит из призмы, основания и воспринимающего элемента (ВЭ) с дополнительной массой [1].

Для расчета параметров такого преобразователя ускорений на основе ОТЭ может быть использована следующая последовательность действий.

1. Выбирается тип материала и форма воспринимающего элемента.
  2. Выбирается источник излучения, создающий оптическую мощность с наибольшей длиной волны излучения.
  3. Определяются размер ВЭ, зависимости прогиба ВЭ  $w=f(a)$  и изменения зазора  $d=f(a)$  от измеряемого ускорения.
  4. Рассчитывается функция преобразования и выбирается угол падения излучения  $\theta$  в зависимости от угла полного внутреннего отражения и размера призмы.
  5. Выбирается значение требуемого начального зазора  $d_0$  между основанием призмы и ВЭ, соответствующее середине линейного участка функции преобразования, которое составляет порядка сотен нанометров.
  6. Выбираются фотоприемник (фотодиод) и определяются зависимости оптической мощности, достигающей фотоприемника  $P_{\text{ФП}}=f(a)$ , и выходного напряжения преобразователя «ток-напряжение»  $U_{\text{I-U}}=f(a)$ , от измеряемого ускорения  $a$ .
  7. Определяется чувствительность отражательной способности  $R$  к изменяемому зазору  $d$  и выбирается рабочий диапазон для обеспечения квазилинейного участка, на котором чувствительность уменьшается не более, чем в  $n$  раз от максимального значения, т.е. до  $S=S_{\text{макс}}/n$ , например, в 2 раза.
  8. Привести анализ выбора параметры ВЭ с помощью отклонения толщины и длины от номинальных значений и найти зависимость выходного напряжения от измеряемого ускорения  $U_{\text{ВЫХ}}=f(a)$ .
  9. Производится разработка блока обработки, обеспечивающего нормирование преобразованного сигнала  $U_{\text{I-U}}$ .
  10. Определяется основная погрешность, нелинейность функции преобразования и дополнительная температурная погрешность.
- Данная методика применена для исследования преобразователей ускорения на основе ОТЭ с различными конструктивными параметрами.

#### *Список литературы*

1. Busurin V.I., Naing Htoo Lwin, Pham Anh Tuan Investigation of microopto-eletromechanical angular velocity and acceleration transducers based on optical tunneling effect // Physics Procedia. 2015. V.73. P.198-204.

А.С. БУСАРОВ, А.В. ВИНОГРАДОВ, Н.Л. ПОПОВ  
*Физический институт им. П.Н. Лебедева, Москва*

## **КОГЕРЕНТНАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ПРИ НАКЛОННОМ ОСВЕЩЕНИИ ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ**

Применение когерентных источников рентгеновского излучения в отражательной оптике, а именно в микроскопии, требует развития методов исследования материалов и поверхностных структур под малыми углами скольжения. Авторами предложена оптическая схема, позволяющая получать рентгеновские изображения наклонных объектов, а также представлены результаты численного моделирования.

A.S. BUSAROV, A.V. VINOGRADOV, N.L. POPOV  
*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **COHERENT X-RAY MICROSCOPY AT INCLINED LIGHTING OF THE REFLECTING OBJECTS**

Application of coherent sources of x-ray radiation in reflective optics, namely in microscopy, demands development of methods of research of materials and surface structures under small grazing angles. Authors offered the optical scheme allowing to receive x-ray images of inclined objects and also results of numerical modeling are presented.

Рентгеновское излучение для большинства материалов отражается от поверхности образца при углах малых углах падения вблизи критического угла полного внешнего отражения (при больших углах падения из-за малой длины волны излучение либо поглощается, либо проходит сквозь образец). Далее, излучение, отраженное от объекта под малым углом, проходит через некоторую оптическую систему и после этого падает на детектор. Задача заключается в том, что оптическая система должна быть такой, чтобы, во-первых, изображение было подобно объекту, а во-вторых, излучение не падало на детектор под малым углом. В настоящей работе используются 3D-геометрия, паракиральная оптика и идеальные оптические элементы, а также методы развитые ранее [1, 2].

На рис. 1 представлена предложенная оптическая схема: когерентный пучок, распространяющийся от наклонного объекта (1), проходит вначале через фазовый экран (2), затем через линзу (3), после чего падает на детектор (4).

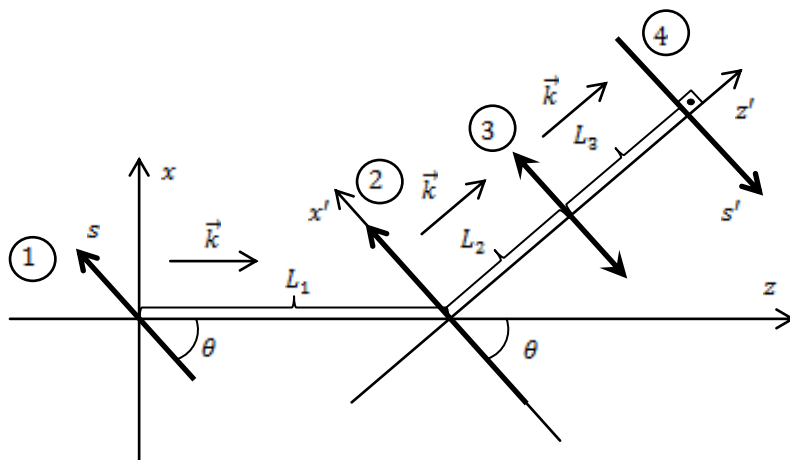


Рис.1. Оптическая схема для получения рентгеновских изображений наклонных объектов

*Список литературы*

1. Artyukov I.A., Mitrofanov A.N., Popov N.L., Vinogradov A.V. Theory and computation towards coherent reflection imaging of tilted objects // Proceedings of the 12th International Conference on X-ray Lasers (Springer-Verlag, Berlin & Heidelberg, 2010), pp. 329-340.
2. Artyukov I.A., Busarov A.S., Popov N.L., Vinogradov A.V. Optical transforms related to coherent imaging of inclined objects // Proceedings of the 13th International Conference on X-Ray Lasers. Paris, France: Springer Proceedings in Physics. 2014. V.147. P.19-27.



Я.В. ГРАЧЕВ, А.В. КУЗЬМИНА, В.Г. БЕСПАЛОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ СКАНИРОВАНИЯ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРЯЕМОГО СИГНАЛА  
В СИСТЕМАХ ИМПУЛЬСНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ  
СПЕКТРОСКОПИИ**

В работе приведен метод оптимизации времени, затрачиваемого на измерения в импульсной терагерцовой спектроскопии, на основе анализа отношения сигнала к шуму и динамического диапазона при использовании разной ширины полосы синхронного усилителя. Приведены зависимости отношения сигнала к шуму и динамического диапазона от затраченного на измерения времени.

Ya.V. GRACHEV, A.V. KUZMINA, V.G. BESPALOV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

**INFLUENCE OF SCANNING TIME SPREAD  
ON PERFORMANCE OF TERAHERTZ  
TIME-DOMAIN SPECTROSCOPY**

The paper describes a method of optimization of time spent on measurements in terahertz time-domain spectroscopy by analyzing the signal-to-noise ratio and dynamic range when using different bandwidths of the lock-in amplifier. The dependencies of the signal-to-noise ratio and dynamic range for the measurement of elapsed time are demonstrated.

Терагерцовое излучение – это электромагнитное излучение, лежащее в интервале между 100 ГГц и 30 ТГц. При использовании систем терагерцовой спектроскопии с разрешением во времени результаты в том или ином исследовании получают с помощью измерения временной формы ТГц импульса и анализа его в частотной области. При описании характеристик производительности систем терагерцовой импульсной спектроскопии, обычной практикой является определение их динамического диапазона (ДД) и отношения сигнал-шум (СШ). Эти характеристики во многом зависят от количества усредняемых измерений. На данный момент не определена закономерность между общим временем сканирования, потраченного на многократные измерения, и качеством сигнала, получаемого после их усреднения.

Так как мощность излучения на типичных импульсных терагерцовых спектрометрах составляет от десятков нановатт до десятков микроватт, то для детектирования сигнала среди шума необходимо применение синхронного усиления, замедляющего процесс измерения сигнала. Быстрое сканирование сигнала механической линией задержки в этом случае приведет к искажению измеряемого сигнала (рис. 1а). При измерении сигнала важно подбирать оптимальную скорость сканирования исходя из временной константы синхронного усилителя.

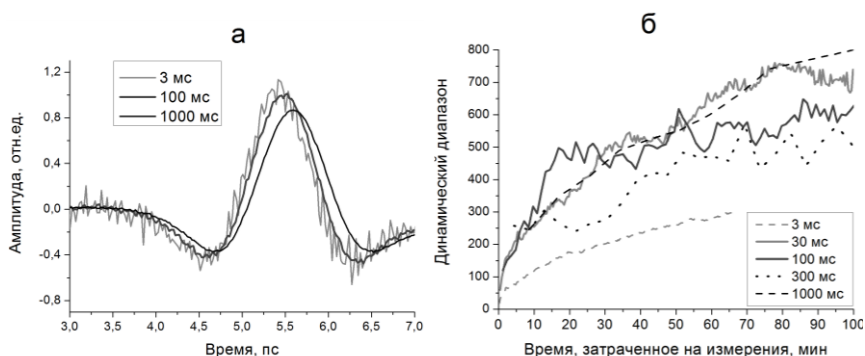


Рис. 1. Зарегистрированная временная форма ТГц импульсов при различных временных константах синхронного усилителя (а); зависимости динамического диапазона от количества затраченного времени на измерения при различных временных константах усилителя (б)

Из приведенных результатов видно, что выбор наибольшей временной константы (узкой полосы усиления) не позволяет рассчитывать на наибольшее значение характеристик спектрометра при определенном времени измерения образца. В частности, в пределах 25 минут измерений наибольшее значение динамического диапазона достигается при временной константе 100 мс, а не при 1000 или 300 мс (рис. 1б). В целом, динамический диапазон и отношение сигнал/шум достигают некоторых стабильных значений, и дальнейшее увеличение времени на измерения не требуется. Применение данного метода позволяет оценить быстродействие и характеристики систем спектроскопии с разрешением во времени.

Работа выполнена в рамках работы по государственному заданию №3.1675.2014/К Министерства образования и науки Российской Федерации.

А.И. БУТЬ, И.А. ЛЯВШУК, А.М. ЛЯЛИКОВ, В.В. ЯНИЧКИН  
*Гродненский государственный университет им.Я. Купалы, Беларусь*

**ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СНИМКОВ  
РАСФОКУСИРОВАННЫХ РЕШЕТОК  
ПРИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ  
НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ФАЗОВОГО ОБЪЕКТА**

Показана возможность повышения чувствительности измерений и исключения систематической погрешности измерений, связанной с аберрациями оптической системы, при визуализации оптических неоднородностей фазового объекта теньевым методом расфокусированных решеток.

A.I. BUTS, I.A. LYAVSHUK, A.M. LYALIKOV, V.V. YANICHKIN  
*Grodno State University named after Ya. Kupala, Belarus*

**OPTICAL IMAGE PROCESSING DEFOCUSED  
GRATINGS OF OPTICAL INHOMOGENEITIES  
IN THE VISUALIZATION PHASE OBJECT**

The possibility of increasing the sensitivity of the measurement, and the systematic exclusion of the measurement error associated with aberrations of the optical system, when rendering the optical phase inhomogeneities of the object by schlieren method of defocused gratings.

В экспериментальной аэро- и гидродинамике, теплофизике, при изучении процессов горения для получения информации об исследуемом объекте используют теньевые методы регистрации оптических неоднородностей на фоне двумерных периодических структур, в частности метод расфокусированных амплитудных решеток или Тальбот-метод. Данные методы являются простыми в реализации, но позволяют рассчитать векторное поле распределения градиентов показателя преломления в исследуемом фазовом объекте [1–3]. В [4] показано, что снимок расфокусированной решетки при значениях периода менее  $5 \cdot 10^{-4}$  м по виду амплитудного пропускания аналогичен амплитудной голограмме фазового объекта. Данная аналогия позволяет применить к обработке снимков расфокусированных решеток принципы фильтрации волн, дифрагированных на снимках при их освещении, для извлечения информации об исследуемом объекте. Однако, как и в голографической

интерферометрии, здесь возможно появление дополнительных аберраций, обусловленных несовершенством решеток, а также системы регистрации и оптической обработки снимков. Кроме того, в случае «слабых» неоднородностей, требуется повышение чувствительности к их визуализации.

Предлагается для извлечения информации о двух составляющих градиента показателя преломления исследуемого фазового объекта при оптической обработке снимка изображения объекта на фоне двухмерной амплитудной решетки дополнительно использовать эталонный снимок решетки, что позволяет повысить точность измерений и регулировать настройку опорных полос. При этом пара снимков размещается в оптически сопряженных плоскостях и восстанавливается, по аналогии как в голографической интерферометрии, коллимированным пучком света, а для извлечения информации о  $x$  и  $y$  – составляющих градиента показателя преломления используется фильтрация соответствующих волн. Настройка на конечные опорные полосы может быть осуществлена путем разворота или наклона одного из снимков на небольшой угол относительно оптической оси. Однако при этом аберрации могут быть скомпенсированы только частично, а настройка опорных полос в конечных интерферограммах ограничена.

Для более полной компенсации аберраций при произвольной настройке и ориентации опорных полос интерферограммы, предлагается перезаписывать снимки изображения вертикальной или горизонтальной структуры решетки, одно из которых искажено фазовым объектом, на двухэкспозиционную голограмму. Полученные голограммы впоследствии восстанавливаются двумя когерентными пучками света и с помощью фильтрации соответствующих волн, восстановленных с голограммы, формируется безабберационная интерферограмма, которая характеризует зоны одинаковой  $x$  или  $y$  – составляющей градиента показателя преломления в оптической неоднородности.

#### *Список литературы*

1. Wang A. Gill P., Molnar A. Light field image sensors based on Talbot effect // Optical Society of America. 2009. V.48. №31. P.5897-5905.
2. Карачинов В.А. и др Решеточные методы визуализации и исследования тепловой структуры диффузного пламени // Вестник Новгородского государственного университета. 2011. №68. С.95-98.
3. Пенязьков О.Г. Тальбот-метод исследования распределения концентрации метана в турбулентной осесимметричной струе // Инженерно-физич. журнал. 2013. Т.86. №2. С.247-255.
4. Ляликов А.М., Серенко М.Ю. Применение голографической интерферометрии при визуализации прозрачных неоднородностей методом расфокусированной решетки // Опт. и спектр. 1994. Т.76. №5. С.810–813.

П.А. ЕРМОЛАЕВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ, М.В. ВОЛКОВ,  
К.П. СЕМЕНКОВ, Н.Б. МАРГАРЯНЦ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **АНАЛИЗ ВИДЕОДАНЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Рассмотрен алгоритм автоматического обнаружения и отслеживания перемещений объектов в микроскопическом масштабе, использующий анализ видеоданных. Получено распределение обнаруженных объектов по размеру, средней скорости и форме. Приведены результаты обработки экспериментальных видеоданных.

P.A. ERMOLAEV, M.A. VOLYNSKY, M.V. VOLKOV,  
K.P. SEMENKOV, N.B. MARGARYANTS  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **ANALYSIS OF VIDEO DATA FOR MICROSCOPIC OBJECTS BEHAVIOUR RESEARCH**

The paper considers algorithm of automatic detection and tracking movements of objects in microscopic scale, which uses analysis of video data. The distributions of detected objects size, average velocities and shapes are given. The results of experimental video data processing are presented.

Использование методов автоматического анализа изображений для исследования активности микроскопических объектов в последнее время приобретает все большую популярность [1–3] ввиду быстрого роста возможностей вычислительной техники [1–2]. Эти методы применяются в микробиологии для изучения взаимодействия микроорганизмов со средой [2, 4], в медицине для анализа причин патологий [5–6] и тестирования новых видов лекарств [6] и в других областях [2].

В настоящее время проводится большое количество исследований, посвященных алгоритмам классификации [4, 6] и детектирования [3, 5] определенных видов микроорганизмов на изображениях, однако практически отсутствуют работы в области анализа поведения микроорганизмов во времени. В данной работе рассматривается алгоритм анализа видеоданных, позволяющий в реальном времени строить траектории движения микроскопических объектов и оценивать их локальную скорость, размер и другие параметры.

Для обнаружения микроскопических объектов в предложенном алгоритме используются методы коррекции фоновой составляющей [2], сегментации [1] и морфологической обработки [2]. На рис. 1 представлены результаты обнаружения объектов на экспериментальном изображении.

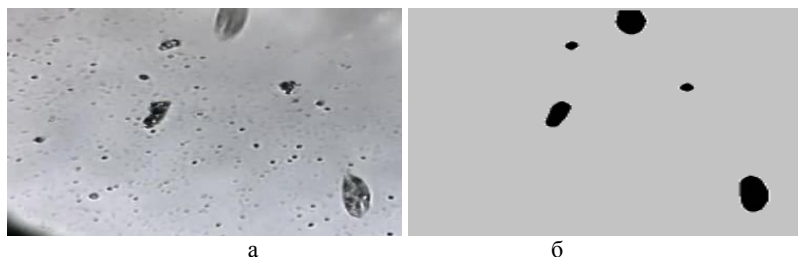


Рис. 1. Примеры изображения бактерий на стеклянной подложке (а) и результат обработки (б)

Видно, что положение связных областей на втором изображении соответствует расположению объектов на первом. Используя методы поиска связных областей [2] можно автоматически оценить количество объектов, их размеры и форму.

Для построения траекторий объектов и оценки их локальной и средней скорости используются корреляционные методы сопоставления участков [2], соответствующих обнаруженным объектам на соседних изображениях анализируемой последовательности.

В работе приведены результаты обработки нескольких экспериментальных последовательностей изображений и оценки распределений объектов по их размеру, форме и средней скорости.

#### *Список литературы*

1. Mohamad N., et. al. Bacteria identification from microscopic morphology: A Survey // Intern. Journal of Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications. 2014. V.3. N.2. P.1–12.
2. Shapiro L., Stockman G. Computer Vision. NJ: Prentice Hall, 2001.
3. Dasgupta S., Das S., Biswas A., Abraham A. Automatic circle detection on digital images using an adaptive bacterial foraging algorithm // Soft Computing. 2010. V.14. P.1151–1164.
4. Hiremath P., Bannigidad P. Automatic identification and classification of bacilli bacterial cell growth phases // IJCA Special Issue on “Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition”. 2010. P.48–42.
5. Forero M., Cristobal G., Alvarez-Borrego J. Automatic identification techniques of tuberculosis bacteria // Proceedings of SPIE. 2003. V.5203. P.63600.
6. Ranzato M., et. al. Automatic recognition of biological particles in microscopic images // Pattern Recognition Letters. 2007. V.28. P.31–39.

И.А. ШЕВКУНОВ, Н.В. ПЕТРОВ, В.Я. КАТКОВНИК<sup>1</sup>

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Технологический университет Тампере, Финляндия*

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗРЕЖЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ АМПЛИТУДЕ И АБСОЛЮТНОЙ ФАЗЕ ОБЪЕКТА**

Представлен новый метод для восстановления волнового фронта для голограмм записанных во внеосевой конфигурации. Преимущество предложенного метода заключается в достоверной фильтрации шумов благодаря использованию разреженного представления и адаптивного объемного метода фильтрации. Разреженное представление позволяет значительно подавлять шумы и сохранять высокую четкость исследуемых объектов.

I.A. SHEVKUNOV, N.V. PETROV, V.Ya. KATKOVNIK<sup>1</sup>

*ITMO University, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>Tampere University of Technology, Finland*

## **WAVEFRONT RECONSTRUCTION IN DIGITAL OFF-AXIS HOLOGRAPHY VIA SPARSE CODING OF AMPLITUDE AND ABSOLUTE PHASE**

This work presents the new method for wavefront reconstruction from digital hologram recorded in off-axis configuration. The main feature of the proposed algorithm is a good ability for noise filtration due to the sparse phase and amplitude reconstruction approach with data-adaptive block-matching 3D technique. The sparsity enables strong suppression of noisy components and accurate revealing of the main features of the signals of interest.

Отличительной особенностью большинства существующих методов цифровой голографии является постановка задачи восстановления волнового фронта – без рассмотрения шумов, возникающих при регистрации голограмм. Это приводит к тому, что во многих случаях восстановленному фазовому полю требуется дополнительная процедура фильтрации шумов [1].

Подтверждением того, что волновой фронт можно рассматривать, как объект в разреженном представлении, является широкое успешное применение данного подхода в цифровой голографии, благодаря

возможности использования теории сжатых множеств и эффективных алгоритмов обработки изображений [2].

В данной работе, мы предлагаем новый итерационный метод для внеосевого восстановления волнового фронта с эффективным подавлением шумов. Он основан на технике нелокального поблочного сравнения и 3Д (ПСЗД) получения изображений [3].

Разреженное представление изображений предполагает, что они хорошо аппроксимируются линейными комбинациями функций взятых из известного набора (словаря). По аналогии с традиционным получением изображений применение разреженного представления эффективно используется для комплексных волновых фронтов, как показано в [4] на примере метода ПСЗД.

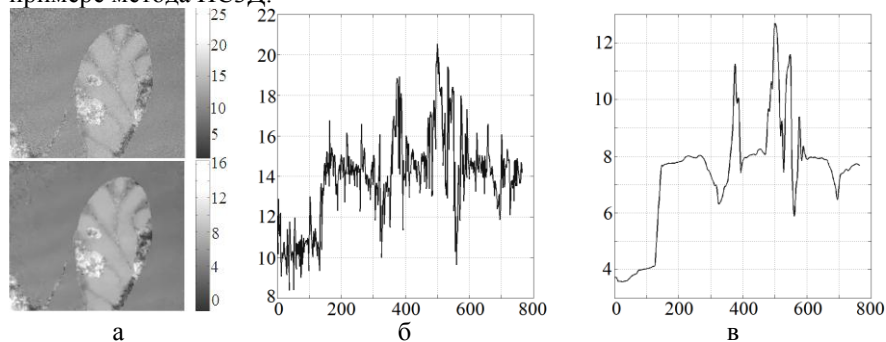


Рис. 1. Результат восстановления объекта: абсолютная фаза восстановленная: верхнее изображение – методом [5], нижнее – предложенным методом (а); продольные сечения абсолютной фазы, восстановленные: методом [5] (б), предложенным методом (в)

На рис. 1 представлены результаты восстановления абсолютной фазы амплитудно-фазового объекта. Для качественной оценки разработанного метода приведены продольные сечения, на которых явно видно подавление шумов с сохранением четких границ особенностей объекта.

Работа выполнена при поддержке Министерство образования и науки Российской Федерации, проект №2014/190, и Академии Наук Финляндии, проект №287150.

#### Список литературы

1. Kemaq Q., et.al. // Appl. Opt. 2007. V.46. P.7412.
2. Rivenson Y., Stern A., Javidi B. // Appl. Opt. 2013. V.52. P.423.
3. Dabov K., et.al. // IEEE Trans. Image Process. 2007. V.16. P.2080.
4. Katkovnik V., Astola J. // J. Opt. Soc. Am. A. 2012. V.29. P.44.
5. Liebling M., et.al. // J. Opt. Soc. Am. 2004. V.21(3). P.367.



Н.Н. ИРТУГАНОВ, И.А. АРТЮКОВ

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМОВ ПРИ МИКРОТОМОГРАФИЧЕСКОМ ИССЛЕДОВАНИИ МАЛОКОНТРАСТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В работе рассматривается метод обработки изображений Перона-Малика, применительно к зашумлённым томографическим изображениям. Приведены результаты в виде обработанных рентгеновских изображений, полученных на микротомографе.

N.N. IRTUGANOV, I.A. ARTYUKOV

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **THE USE OF NON-LINEAR FILTERS IN MICROTOMOGRAPHY OF LOW-CONTRAST OBJECTS**

This work deals with the image processing method based on a model of Perona-Malik in application to tomographic images with a low signal/noise ratio. Examples of processed images are given.

Исследование малоконтрастных и малоплотных объектов требует фильтрации шумов разной природы. Широко известными методами шумоподавления являются диффузионные методы фильтрации. Результаты их работы весьма впечатляющие и связано это, прежде всего с тем, что в отличие от других методов устранения шумов, которые предполагают последовательные алгоритмы обработки, процесс диффузии и непосредственное устранение шума действуют как один процесс. Диффузионные фильтры классифицируются на два типа: линейные и нелинейные. Линейные фильтры обладают рядом недостатков, таких как дислокация краёв и одинаковое размытие всех частей изображения, что приводит к потере информации о мелких деталях. В свою очередь нелинейная фильтрация отличается способностью распознавать контрастные участки, что является важной особенностью для обработки малоконтрастных томографических изображений. Все диффузионные фильтры основываются на решении уравнения диффузии с заданным коэффициентом диффузии, который в модели Перона-Малика выглядит следующим образом:

$$\partial_t u = \operatorname{div}(D(|\nabla u|^2) * \nabla u), \quad \text{где } D(u) = \frac{\lambda}{1 + \frac{|\nabla u|^2}{k}}$$

На рис. 1 показан результат фильтрации шумов с использованием модели Перона-Малика на примере рентгеновского изображения, полученного на микротомографе SKYSCAN 1074.

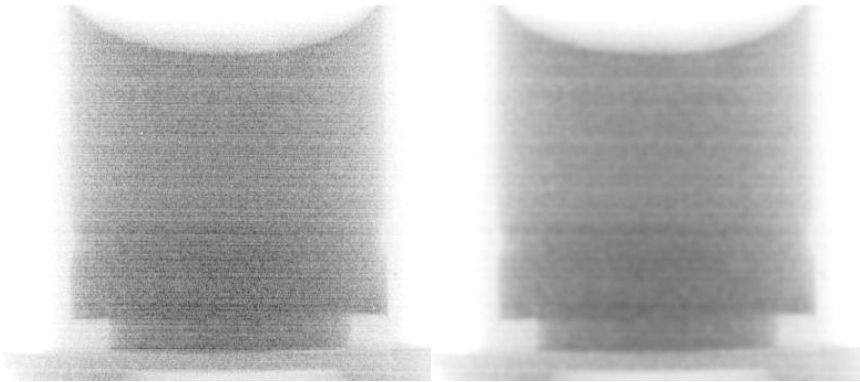


Рис. 1. Результат фильтрации шумов с использованием модели Перона-Малика

Из результатов обработки можно заключить, что модель Перона-Малика является эффективным инструментом подавления шума при микрографическом исследовании объектов, обладающих незначительным контрастом и плотностью.

*Список литературы*

1. Perona P., Malik J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1990. V.12. No.7. P.629-639.

Т.А. ВОВК, Т.Ю. НИКОЛАЕВА, Н.В. ПЕТРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **КАЛИБРОВКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ОБЪЕМА С ЧАСТИЦАМИ НА ОСНОВЕ ОТНОШЕНИЯ ПИКА КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ К ПЬЕДЕСТАЛУ**

В данном сообщении исследуется новый метод характеристики взвешенных в объеме однотипных сферических частиц с помощью отношения пика корреляционной функции к пьедесталу. Корреляционная функция рассчитывается для двух соседних слоев объема, содержащих частицы. Метод был изучен с помощью численного моделирования, а также был проверен экспериментально.

T.A. VOVK, T.Yu. NIKOLAEVA, N.V. PETROV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **CALIBRATION OF THE METHOD FOR ESTIMATING THE VOLUME OF PARTICLES BASED ON PEAK TO PEDESTAL RELATION OF CORRELATION FUNCTION**

In this communication, a new method for particles characterization in a volume is investigated. It based on the analysis of the ratio of correlation function peak to its pedestal, calculated for adjacent planes of the volume. The method has been studied in the numerical model and was confirmed experimentally.

Предложен новый метод определения концентрации частиц в объеме на основании отношения пика корреляционной функции, рассчитанной для двух записанных в соседних плоскостях изображений частиц, к ее пьедесталу. Изображения получаются путем записи осевых голограмм по методу Габора, восстанавливаемых численным моделированием распространения когерентного волнового фронта в плоскости (слое) объема. Данный метод записи голограмм-изображений взвеси частиц в объеме был рассмотрен ранее в [1, 2, 3].

Для оценки эффективности данного метода как инструмента была создана программная модель, позволяющая исследовать предложенный метод на большой статистической выборке. На первом этапе послонно формируется объем с частицами, для которых заданы определенные распределение, размеры и количество частиц, затем в этом объеме моделируется распространение когерентного волнового фронта (голограмма Габора). На следующем шаге производится обратное

распространение волнового фронта от полученной голограммы и восстановление двух изображений объема – соседних слоев, содержащих сфокусированные частицы. На третьем этапе от двух изображений берется функция взаимной корреляции, для которой вычисляется параметр – отношение пика этой функции к ее пьедесталу. Процесс многократно повторяется с изменением концентрации и размеров частиц.

Отношение пика корреляционной функции к пьедесталу между сечениями соседних слоев объема возрастает с увеличением концентрации частиц что обусловлено увеличением неповторяющихся элементов изображений.

Было показано, что численное моделирование, проведенное с помощью графической среды программирования LabView, повторяет экспериментальные данные с большой долей точности. При обширной статистической выборке метод может быть откалиброван для частиц с определенными характеристиками и впоследствии может быть использован для быстрого детектирования, измерения и учета частиц в объеме, например, в задачах биологии и океанологии (учет планктона в морской воде), в изучении динамики потоков частиц, в исследовании прозрачных сред, в таких практических задачах, как впрыск топлива, сельскохозяйственные спреи, фармацевтика и другие.

Исследование зависимости отношения пика к пьедесталу функции корреляции от концентрации частиц показало, что в общем случае равномерного распределения частиц в объеме эта зависимость является линейной.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Н.В. Петров благодарит за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект №2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

#### *Список литературы*

1. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. Characterization of particles suspended in a volume of optical medium at high concentrations by coherent image processing // Opt. Eng. 2015. V.54(8). P.101.
2. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. Statistical study of coherent images of particles in the volume of optical medium // Proc. SPIE. 2014. V.9216. P.921612.
3. Николаева Т.Ю., Петров Н.В. Исследование объема с высокой плотностью частиц на основе контурного и корреляционного анализа изображений // Вестник ИТМО. 2014. Т.94(6). С.15-21.

В.В. ДУДЕНКОВА<sup>1</sup>, Ю.Н. ЗАХАРОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

<sup>2</sup>*Гарвардский университет, Кембридж, США*

## **СОВМЕЩЕНИЕ BaLM И ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДОВ В ОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПОЛУПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Для достижения трехмерного сверхвысокого разрешения при исследовании микрообъектов предлагается использовать новую оптическую схему, совмещающую возможности анализа мерцания флуоресценции (BaLM) и голографического подхода.

V.V. DUDENKOVA<sup>1</sup>, Yu.N. ZAKHAROV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Harvard University, Cambridge, USA*

## **COMBINATION OF BaLM AND HOLOGRAPHIC METHODS IN THE SAME OPTICAL SETUP TO OBTAIN SUPERRESOLUTION IN CASE OF STUDING OF TRANSLUCENT MICROOBJECTS**

For achievement of three dimensional ultrahigh resolution in case of research of micro objects it's offered to use the new optical schematics combining possibilities of the analysis of fluorescence by bleaching/blinking assisted localization microscopy (BaLM) and holographic approach.

При изучении малоконтрастных и почти прозрачных в оптическом диапазоне микрообъектов с помощью традиционной световой микроскопии возникает ряд трудностей, связанных с низким контрастом получаемых изображений и ограниченной разрешающей способностью, тогда как для схем записи на отражение и на прохождение зондирующего излучения, разрешающая способность является одним из важнейших параметров. На данный момент разработано большое количество подходов для увеличения этого параметра выше дифракционного предела. Для улучшения поперечного разрешения одним из наиболее перспективных и применимым к широкому классу объектов, является метод флуоресцентного анализа BaLM [1]. BaLM подход состоит в возбуждении флуоресценции, регистрации и анализе мерцания

флуорофоров и, соответственно, может быть применен для визуализации специально окрашенных образцов, либо имеющих эндогенные флуорофоры. Для изучения со сверхвысоким продольным разрешением изменений пространственной структуры прозрачных в видимом диапазоне живых биологических препаратов успешно применяется цифровая голография [2].

Для достижения сверхвысокого разрешения по всем направлениям можно совместить в одной оптической схеме голографическую запись и флуоресцентный ВаLM метод. Для ВаLM метода традиционным является прием отраженного флуоресцентного сигнала, но в данной схеме более оптимально использование проходящего флуоресцентного сигнала. В таком случае, во внеосевой голографической схеме необходимо применить светоделитель, который позволит использовать часть светового пучка, идущего от объекта для ВаLM анализа, а второй использовать в качестве предметной волны в голографической схеме.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 15-42-02658 «Разработка и использование когерентных и флуоресцентных методов сверхвысокого разрешения в оптическом диапазоне для исследования динамики пространственной структуры и функционального состояния живых биосистем».

*Список литературы*

1. Burnette D.T., Sengupta P., Dai Y., Lippincott-Schwartz J., Kachar B. Bleaching/blinking assisted localization microscopy for superresolution imaging using standard fluorescent molecules // PNAS. 2011. V.108. №52. P.21081.
2. Dudenkova V.V., Murav'eva M.S., Rybnikov A.I., Zakharov Yu.N. Achievements of superresolution in optical-thickness measurements and statistical localization of fluorophores in holographic and fluorescent microscopy // Radiophysics and Quantum Electronics. 2015. V.57. Is. 8-9. P.551.

А.Ю. БЫКОВСКИЙ

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ В ПРОЦЕДУРАХ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОЗНАЧНО-ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АГЕНТА

Обсуждается использование алгоритма многокритериальной оптимизации в процедуре логической минимизации многозначно-логических функций, используемых в модели интеллектуального агента.

A.Yu. BYKOVSKY

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## THE MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION FOR THE FORMATION OF THE MULTIPLE-VALUED LOGIC MODEL OF AN AGENT

Algorithm of the multi-objective optimization is being discussed, applied for the logic minimization of multiple-valued logic functions in the intellectual agent model.

Гетерогенные логические модели, предлагаемые для оптоэлектронной обработки информации в интеллектуальных агентах [1], в качестве связующего “скелета” используют сетевую структуру отображений функций  $k$ -значной логики (алгебры Аллена-Живона)

$$X_{\delta^* \varepsilon^* \zeta^*}^{\alpha^* \beta^* \gamma^*} = F \left( X_{\delta \varepsilon \zeta}^{\alpha \beta \gamma} \right), \quad (1)$$

компактно описывающих преобразование наборов переменных  $\alpha, \beta, \dots$  в  $\alpha^*, \beta^*, \dots$ . Такие многопараметрические функции удобны для управления сложными процедурами вычислений точных (многозначно-логических и булевых) и приближенных (нечетко-логических) переменных. Практически, при работе с ними экспертные знания о работе агента следует исходно представить в виде таблиц, с помощью которых записывают соответствующий набор логических минтермов. Далее для полученного выражения требуется провести известную процедуру логической минимизации [2]. Однако поиск минимизированного вида функции при этом сопряжен с добавлением в логическую формулу вспомогательных минтермов для так называемых “безразличных” значений функции (don't care states), не использованных в исходной таблице истинности. Фактически, при этом расширительно

корректируется исходный вид этой функции, что, например, в задачах выбора оптимального маршрута или маневра робота может далее повлиять на принятие оптимального решения.

Соответственно, при выборе “безразличных” значений в процессе минимизации многозначно-логической функции предлагается использовать специальный набор правил, задаваемый отдельной многозначно-логической функцией  $F_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{\alpha\beta\gamma\delta}$ , описывающей ограничения параметров при минимизации. При этом задача оптимального выбора текущих значений переменных с помощью  $F_{\varepsilon\zeta\eta\theta}^{\alpha\beta\gamma\delta}$  может быть описана как задача многокритериального выбора оптимальных по Парето решений [3]. Здесь для образов подмножеств значений логических переменных можно рассматривать известную задачу векторной оптимизации, где

$$Q(X)=(q_1(X), \dots, q_k(X)) \rightarrow \min; D: h_j(X) \geq 0, \quad (2)$$

где  $q_i(X)$ - частные показатели качества,  $h_j(X)$  - ограничения на допустимое множество решений  $D$ . Оптимальным по Парето будет решение  $X_0$ , если не существует решение  $X \in D$ , для которого  $q_i(X) \geq q_i(X_0)$  и значение хотя бы одного показателя строго больше, чем для  $X_0$ .

Однако сложность работы с множеством Парето связана с тем, что не все решения из этого множества сравнимы между собой. Поэтому процесс логической минимизации для многозначно-логической функции [1] предлагается разбить на отдельные шаги, где по необходимости будет проводится так называемая итерационная процедура сужения множества Парето [3]. При этом вместо диалога {ЭВМ}-{Лицо Принятия Решений}, используемого в [3], для анализа множества Парето следует использовать набор точных или приближенных (нечетко-логических) правил Если...То... .

Представляется, что использование инструментария работы с множеством Парето для минимизации многозначно-логической функции поможет в итоге упростить реализацию систем распознавания образов и компьютерного зрения для интеллектуального агента.

#### Список литературы

1. Bykovsky A.Yu. Discrete K-valued logic for multi-parametrical modeling of a robotic agent // Physics Procedia. 2015. V.73. P.257-263.
2. The allen-givone implementation oriented algebra // in Computer science and multiple-valued logic: theory and applications / ed. D.C. Rine. North Holland, Amsterdam, 1984. P.262-283.
3. Воловик М.А., Соустин Б.П. Проектирование систем управления космическими аппаратами. Новосибирск: Наука, 1999.



П.А. ИВАНОВ

*Ярославский государственный технический университет*

**ИНВАРИАНТНЫЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ  
В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ  
ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, с помощью составных фильтров МСЭК, ГМСЭК, MINACE и DCCF.

P.A. IVANOV

*Yaroslavl State Technical University*

**INVARIANT CORRELATION FILTERS IN PROBLEMS  
OF GEOMETRICALLY DISTORTED IMAGES RECOGNITION**

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations recognition are given. There were used several distortion invariant correlation filters: MACE, GMACE, MINACE and DCCF.

Весьма перспективным подходом, в связи с высокой степенью параллелизма оптических вычислений, естественностью осуществления операций типа свертки/корреляции в оптике, наличием высокоскоростных электронных средств постобработки данных, является применение возможностей оптоэлектроники в задачах распознавания изображений. Полутоновое изображение, зарегистрированное оптикоэлектронной системой регистрации поступает на вход блока предобработки, выполняющего измерение и подстройку контраста и яркости и, затем, выделение контуров. После предобработки оконтуренное (бинаризованное) изображение поступает на вход коррелятора.

При корреляционном распознавании изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, выходной корреляционный пик резко деградирует при самых малейших изменениях геометрии распознаваемого объекта (за исключением преобразования сдвига, т.к. корреляционная функция обладает автоматической инвариантностью к этому типу преобразований). Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [1].

Основные исследуемые на сегодняшний день алгоритмы синтеза корреляционных фильтров относятся к следующим реализациям [1]:

1. Алгоритмы на основе разложений входных данных в функциональные ряды (например, разложение по радиальным гармоникам Меллина, фильтр с линейными фазовыми коэффициентами и т.д.)
2. Алгоритмы синтеза составных фильтров на основе вычисления оптимизационного параметра (МСЭК, ГМСЭК-фильтры и т.д.).
3. Алгоритмы, в основе которых лежит синтез фильтра на основе ядер интегральных преобразований (вейвлет-преобразования и т.д.).

В качестве среды моделирования был выбран пакет Matlab Mathworks, как наиболее подходящий для подобного рода задач. В качестве исходных изображений использовалась база данных объекта типа “самолет”, подвергнутых различным преобразованиям геометрии. На основе указанной базы были синтезированы фильтры (для каждого случая отдельно), после чего вычислялись корреляции (корреляционные функции) всех объектов из этой же базы данных с построенными фильтрами. Вычислялись величины пиков корреляции, нормированные на максимальное значение (количественные характеристики пика), а также величины отношений значения пика корреляции к отклонению от среднего (по фону корреляционной картины), и значения пика корреляции к среднеквадратическому отклонению от среднего (по фону корреляционной картины), соответственно (качественные характеристики пика).

Результаты моделирования позволяют надеяться на успешное применение составных фильтров для подобного класса задач.

*Список литературы*

1. Vijaya Kumar B.V.K. Tutorial survey of composite filter design for optical correlators // Appl. Opt. 1992. V.31. P.4773-4801.

Е.К. ПЕТРОВА, Р.С. СТАРИКОВ, Д.В. ШАУЛЬСКИЙ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ПОВОРОТА**

Приводятся результаты исследований по применению инвариантных корреляционных фильтров при распознавании цветных изображений.

E.K. PETROVA, R.S. STARIKOV, D.V. SHAULSKIY  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **MODELLING OF INVARIANT CORRELATION RECOGNITION OF COLOR IMAGES OF ROTATED OBJECTS**

This paper presents results of research of the characteristics of correlation filters for invariant recognition of color images.

Использование при распознавании изображений информации о цвете «объектов интереса» почти всегда позволяет повысить качество распознавания. Общеизвестный резон состоит в том, что в случае более сложных изображений, например цветных фотографий, отдельно взятые цветовые каналы могут оказаться более информативными при распознавании, чем полутоновое чёрно-белое представление. В настоящей работе рассматривается возможность инвариантного корреляционного распознавания на основе применения корреляционных фильтров с минимизацией шума и энергии корреляции (КФ МШЭК) [1], в частности такие фильтры могут обеспечивать распознавание полутоновых изображений на сложном фоне, а также в присутствии пространственного шума. Ранее проведённые исследования показали достижимость высоких характеристик распознавания с помощью КФ МШЭК. Для первоначального моделирования были взяты изображения простых объектов на равномерном фоне. Предполагалась необходимость различения истинного объекта от ложных трёх типов. Размеры изображений – 512x512 пикс, глубина цвета 16 бит, использовалась стандартная модель цвета RGB. Цвет объектов и фона выбирался схожим (зелёный), но в цвете объекта отсутствовала синяя составляющая, а в цвете фона - красная. Рис. 1 иллюстрирует разницу просто полутонового

чёрно-белого представления исходного цветного изображения и одного из его цветовых каналов.

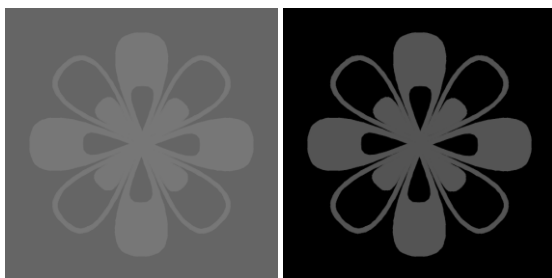


Рис. 1. Полутоновое чёрно-белое изображение истинного объекта и его же изображение, полученное по красному каналу RGB

Были синтезированы различные варианты КФ МШЭК, обеспечивающие инвариантность к повороту, использовались различные условия их синтеза [2]. Распознавание изображений красного канала обеспечило в лучших случаях вероятность правильного решения, оценивавшуюся по критерию Неймана-Пирсона свыше 99%. Также были получены результаты распознавания истинного объекта на фоне сложной сцены, содержащей также изображения ложных объектов. Таким образом, продемонстрированы принципиальные возможности инвариантного корреляционного распознавания цветных изображений с использованием КФ МШЭК. Дальнейшие работы предполагают исследования распознавания более сложных изображений и количественную оценку возможного улучшения качества распознавания при варьировании информации цветовых каналов при синтезе фильтров.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-19-01751.

*Список литературы*

1. Ravichandran G., Casasent D.P. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl. Opt. 1992. V.31. P.1823-1833.
2. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.

М.Г. ДАВЫДОВА<sup>1</sup>, П.В. КОРОЛЕНКО<sup>1,2</sup>,  
Ю.В. РЫЖИКОВА<sup>1</sup>, С.А. ФЕДОРОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

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

## **СКЕЙЛИНГ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР С СИММЕТРИЕЙ САМОПОДОБИЯ**

Рассмотрена проблема влияния изменения структурной симметрии самоподобия на оптические свойства аperiodических оптических элементов (дифракционные решетки, многослойные системы и т.п.). Особое внимание уделено процессу формирования фрактальных паттернов в оптических характеристиках структур и их аппроксимантов. Найдена связь между структурными особенностями рассматриваемых объектов и проявлением фрактальных свойств зондирующего излучения.

M.G. DAVYDOVA<sup>1</sup>, P.V. KOROLENKO<sup>1,2</sup>,  
Yu.V. RYZHIKOVA<sup>1</sup>, S.A. FEDOROV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow state university*

<sup>2</sup>*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **SCALING IN THE CHARACTERISTICS OF QUASIPERIODIC STRUCTURES WITH SELF-SIMILAR SYMMETRY**

The problem of the influence of the changes in the structural symmetry of self-similarity on the optical properties of the aperiodic optical elements (diffraction gratings, multilayered systems, etc.) is considered. Particular attention is given to the process of formation of fractal patterns in the optical characteristics of the structures and their approximants. The relationship between the structural features of these objects and fractal properties of the probing radiation is found.

Структуры, близкие к периодическим, нашли широкое применение в современной фотонике и информационной оптике. В частности, они используются в голографии, технологии изготовления фрактальных фокусаторов, в оптической когерентной томографии, рентгеновской микроскопии, криптографии и оптической диагностике [1-3].

Новые разработки диагностических систем часто осуществляются на основе решения фундаментальной проблемы фрактальной оптики, связанной с установлением взаимного соответствия между структурной

симметрией самоподобия и скейлинговыми свойствами зондирующего излучения [4-5]. В отличие от более ранних работ [3-6] в данном докладе указанная проблема рассматривается в более общем виде с учетом возможности внесения в исследуемые объекты значительных изменений, влияющих на симметрию самоподобия. Эти изменения производятся путем перехода к формированию структур более высокого уровня на основе использования свойств систем  $m$ -боначчи, Колакоски, а также аппроксимантов квазипериодических последовательностей [1, 2, 5]. Расчет оптических характеристик исследуемых объектов основывался на нахождении их фурье-образов и спектров отражения с привлечением матричного подхода. Особое внимание уделено возможностям паттерного анализа [6] характера трансформации распределения поля зондирующих пучков.

В ходе работы был определен ряд идентифицирующих параметров – коэффициенты скейлинга, кластерные размерности, присущих выделенным фрагментам оптических характеристик аперриодических (в том числе и наноструктурированных) систем. Их оценка позволяет установить количественную связь между структурными особенностями исследуемых объектов и фрактальными свойствами взаимодействующего с ними светового излучения. Один из наиболее важных результатов проведенного исследования состоит в том, что фрактальные свойства зондирующего излучения отчетливо проявляются лишь в определенном диапазоне изменений уровня симметрии анализируемых оптических элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ офи\_м (грант № 14-22-01086).

#### *Список литературы*

1. Mahmoud R.A. Hardware implementation of binary Kolakoski sequence // IJCS. 2015. V.5. P.61-67.
2. Furlan W.D., Ferrando V., Monsoriu Ju.A. Focusing properties of diffractive lenses constructed with the aperiodic  $m$ -bonacci sequence // Proc. of SPIE. 2015. V.9450. P.945014.
3. Albuquerque E.L., Cottam M.G. Theory of elementary excitations in quasiperiodic structures. // Phys. Rep. 2003. V.376. P.225-337.
4. Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжикова Ю.В. Скейлинг в характеристиках аперриодических многослойных структур. // Оптический журнал. 2012. Т.79. №12. С.11-16.
5. Короленко П.В., Мишин А.Ю., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. 1D и 2D модели аппроксимантов квазикристаллических структур // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. Т.20. №3. С.17-23.
6. Korolenko P.V., Ryzhikov S.B., Ryzhikova Yu.V. Pattern stability in diffraction of light from structures with self-similarity symmetry. // Physics of Wave Phenomena. 2013. V.21(4). P.256-260.

А.М. БОБРЕШОВ, Е.В. ЗОЛОТУХИН, А.Г. КОШЕЛЕВ

*Воронежский государственный университет*

## **ОРГАНИЧЕСКИЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ СВЕТОДИОД КАК ДИСПЛЕЙ КРУГОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Предложен многоканальный органический светоизлучающий диод (воксел) с круговым RGB-излучением и функциями дисплея содержащего цилиндрический экран.

A.M. BOBRESHOV, E.V. ZOLOTUKHIN, A.G. KOSHELEV

*Voronesh State University*

## **THE OLED MULTICHANNEL DIODE AS CIRCULAR DISPLAY**

A multi-segment OLED voxel with circular radiation is created. The possible construction of voxel as 3d cylindrical display is offered.

Прогресс в развитии технологий производства органических полупроводниковых светоизлучающих диодов, обеспечивающих более высокие конструктивно-технологические, электрические и энергетические характеристики [1], привел к бурному росту их применения в современных устройствах отображения видеoinформации, устройствах формирования трехмерного изображения и устройствах передачи кодированного сигнала изображения, обладающего высокой степенью защиты от не санкционированного доступа [2].

Авторами данной работы предложен органический светоизлучающий диод с круговым многоканальным (многоцветным) излучением основных независимых RGB-цветов [3], обладающий функциями дисплея содержащего цилиндрический экран.

Устройство содержит общий катод и прозрачные аноды между которыми расположены полупроводниковые материалы (эмиссионные слои), способные при подаче напряжения на их электроды соответственно излучать красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue) цвета.

На рис. 1 представлена упрощенная конструкция дисплея с цилиндрическим экраном на основе многоканального органического RGB диода. В нем органические слои и слой анода разделены по окружности на заданное количество светоизлучающих RGB-сегментов и образуют цилиндрический экран, содержащий  $n$  кольцевых строк и  $m$  столбцов,

обеспечивающих возможность развертки кадров, как по строкам, так и по столбцам, а также поворота изображения вокруг оси цилиндрического экрана.

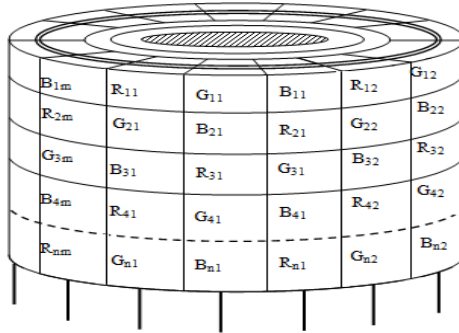


Рис. 1. Упрощенная конструкция дисплея с цилиндрическим экраном на основе многоканального органического RGB-светодиода

Рассмотренное устройство может быть использовано для отображения трехмерных объектов, в частности, в системах навигации, машинного проектирования и конструирования, для визуализации томографической информации и при проведении сложных операций в медицине, при моделировании трехмерных задач в науке и технике, в компьютерных тренажерах и играх, рекламе, развлекательных мероприятиях, телевизионном вещании и т.п.

#### *Список литературы*

1. Самарин А.В. Жидкокристаллические дисплеи. Схемотехника, конструкция и применение. М.: СОЛОН-Р, 2002.
2. Бобрешов А.М., Кошелев А.Г., Золотухин Е.В., Чистилин Д.А. Метод передачи сигнала изображения с применением светоизлучающего диода кругового многоканального RGB излучения // XX-я Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 2014. Т.1. С.231-236.
3. Кошелев А.Г., Бобрешов А.М., Золотухин Е.В. Патент РФ №2548603 «Органический светоизлучающий диод» от 23.03.2015 г.



Н.И. КАПЫРИН, С.К. КОЛДАСОВА

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*

## **ЯЗЫК ФОРМАЛЬНОГО ОПИСАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ**

Разработка среды моделирования оптических устройств на основе языка SVG/XML для описания и имитации оптических процессов в фотограмметрической аппаратуре.

N.I. KAPYRIN, S.K. KOLDASOVA

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **A FORMAL LANGUAGE FOR OPTICAL PROCESSES AND A TOOL FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF PHOTOGRAMMETRIC EQUIPMENT**

Development of a SVG/XML-type simulation language and environment to capture layout and optical effects describing photogrammetric equipment.

При прототипировании оптических устройств, новые разработчики сталкиваются с входным барьером профессиональных пакетов моделирования, а при оптимизации компоновки и параметров устройства – со сложностью обеспечения интерфейсов между моделями и средствами автоматизации поиска оптимальных параметров [1].

Представленный в данной работе формальный язык для описания оптических процессов основан на SVG/XML (Scalable Vector Graphics - это XML формат для описания масштабно-независимой графики) и имеет графическую и текстовую форму – схемы доступны для редактирования в распространённых векторных редакторах и могут быть включены в качестве иллюстрации в любой документ, но также допускают машинную интерпретацию.

На основе результатов по разработке среды моделирования оптических устройств для описания оптических процессов в фотограмметрической аппаратуре, демонстрируется оптимизация параметров этой системы, представленной моделью, сгенерированной из разработанного векторного описания.

Модель включает в себя эффекты геометрической оптики, дифракции и интерференции, необходимые для описания фотограмметрической аппаратуры [2], осуществляющей аэрофотосъёмку или ориентацию по звёздам [3], и содержащую различные элементы, представленные на графическом чертеже системы – бленды, линзы, стенки каналов, матрицы и др.

Задача ориентации по изображению относительно шаблона с заданной точностью требует модели связывающей точность распознавания объектов (не затрагивая алгоритмы сопоставления) с геометрическими параметрами оптической системы, оптимизация которых выполняется автоматически после генерации кода с распределением входов и выходов математической модели.

В перспективе планируется создавать экспортные преобразователи для распространённых программ 3D и САД моделирования, для использования 3D геометрических моделей при генерации задач оптимизации, и включать в язык новые взаимодействия, от гравитационного линзирования до химических реакций при излучении и поглощении.

#### *Список литературы*

1. Грамматин А.П., Романова Г.Э., Балащенко О.Н. Расчёт и автоматизация проектирования оптических систем. Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013.
2. Безменов В.М. Фотограмметрия. Построение и уравнивание аналитической фототриангуляции. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета КГУ, обучающихся по специальности «Астрономогеодезия». Казань: КГУ, 2009.
3. Раушенбах Б.В., Токарёв Е.Н. Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974.

А.А. КУТАНОВ, И.А. СНИМЩИКОВ, С.У. НУРБЕК,  
С.С. ВЕЛИКАСОВ, В.П. МАКАРОВ

*Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН КР, Бишкек,  
Кыргызстан*

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ И ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ НА НИХ**

Получены интерференционные спектральные фильтры на пленках аморфного кремния методом магнетронного напыления на отражающий металлический слой, предварительно нанесенный на стеклянную подложку. Интерференционные фильтры на пленках а-Si, позволяют выделять из исходно белого света соответствующие квазимонохроматические компоненты длин волн с узкой областью пропускания. Толщина пленки аморфного кремния определяет центральную длину волны полосы пропускания такого фильтра. Представлены результаты прямой лазерной записи на слое аморфного кремния интерференционного фильтра излучением BluRay лазера с  $\lambda = 405$  нм и зеленого лазера с  $\lambda = 532$  нм. Показано формирование рельефа записи в пленке а-кремния и ее просветление при воздействии лазерного излучения.

A.A. KUTANOV, I.A. SNIMSHIKOV, S.U. NURBEK,  
S.S. VELIKASOV, V.P. MAKAROV

*Institute of Physical-Technical Problems and Material Science of NAS KR, Bishkek,  
Kyrgyz republic*

## **INTERFERENCE SPECTRAL FILTERS ON AMORPHOUS SILICON FILMS AND DIRECT LASER RECORDING ON IT**

The interference spectral filters on the amorphous silicon films deposited by magnetron sputtering on the reflective metal layer on a glass substrate are presented. Interference filters select from white light source components corresponding to quasi-monochromatic wavelength with a narrow bandwidth. The film thickness of the amorphous silicon determines the center wavelength of the pass band of the filter. Direct laser recording on amorphous silicon layer of the interference filters by single-mode Blu Ray laser  $\lambda = 405$  nm and green laser with  $\lambda = 532$  nm are demonstrated.

### **1. Интерференционные спектральные фильтры на пленках а-Si**

Получены интерференционные спектральные фильтры на пленках аморфного кремния, структура которых приведена на рис. 1. Толщина пленки аморфного кремния  $d$  определяет центральную длину волны

полосы пропускания такого фильтра. Интерференционные фильтры на пленках аморфного кремния отражают часть спектра падающего излучения, благодаря явлению многолучевой интерференции в тонких диэлектрических плёнках. Интерференционные спектральные фильтры на аморфном кремнии могут найти применение в спектроскопии, лазерной технике и для прямой лазерной записи.

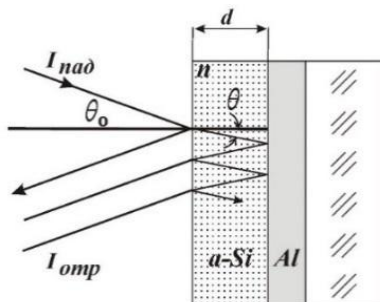


Рис. 1. Структура интерференционного фильтра на пленках a-Si

## 2. Прямая лазерная запись на слое a-Si интерференционного фильтра

Ранее нами была показана возможность прямой лазерной записи на пленках a-Si лазерным излучением с различными длинами волн 1. Результаты эксперимента наглядно показывают, изменение пропускания слоя аморфного кремния после экспонирования его лазерным излучением. Слой а-кремния просветляется под воздействием лазерного излучения. Под действием сфокусированного излучения лазера происходит локальное изменение коэффициента преломления пленки a-Si при его экспонировании. Продемонстрирована возможность прямой лазерной записи BluRay лазером с  $\lambda=405$  нм и зеленым лазером с  $\lambda=532$  нм (рис. 2) на слое a-Si интерференционного фильтра.



Рис. 2. Прямая лазерная запись на слое a-Si интерференционного фильтра

### Список литературы

1. Kutanov A.A., Snimshikov I.A., Nurbek S.U. Direct laser recording on amorphous silicon film // Physics Procedia. 2015. V.73. P.82-86.

**А.В. ЯНОВСКИЙ**

*Научно-технический центр "Атлас", Москва*

## **КОМБИНИРОВАННАЯ ЗАЩИТНАЯ ГОЛОГРАММА С ОБЪЁМНЫМ ПРЕДСТАВЛЕНИЕМ АНАЛОГОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Анализируется состояние и проблемы стоящие перед современной защитной голографией и присущие ей недостатки. Предлагается новый подход к созданию защитных голограмм на основе разработки комбинированных голограмм нового поколения совмещающих в себе цифровую и аналоговую запись 3D-объектов.

**A. V. YANOVSKY**

*Scientific and Technical Centre «Atlas». Moscow*

## **THE COMBINED SECURITY HOLOGRAM PROVIDING A 3D-DISPLAY OF ANALOG IMAGE**

A current state of and problems facing the modern protective holography as well as its inherent drawbacks are studied. Relying on the design of combined new-generation holograms combining digital and analog records of, respectively, planar and volume images, a pioneering approach to protective hologram construction is introduced.

Одним из направлений практического приложения голографии является защитная голография, которая благодаря своей конфиденциальности, наглядности и комфортности восприятия заслуженно занимает одно из ведущих мест в системе визуальных средств защиты товаров и документов от их несанкционированных аналогов.

Ранее, в сообщениях [1, 2] уже говорилось о вновь возникших обстоятельствах, при которых голограмма, первоначально призванная быть основным инструментом защиты продукции от подделки, сама стала объектом подделки, нередко успешно замещающим собой подлинную голограмму.

Причина такой "успешной подмены" видится в следующих обстоятельствах:

- вероятность ошибочной визуальной идентификации защитной голограммы ввиду чрезмерной обфусцированности её дизайна или неподготовленности наблюдателя;

- трудности с "поиском" и идентификацией "спрятанных" внутри голограммы защитных элементов микро- и макроуровня;

- недостаточная, несмотря на все прилагаемые усилия, закрытость и сложность защитной голограммы позволяющая сымитировать её на достаточно высоком техническом и дизайнерском уровне подобия;

- возможность упрощённой подмены легальной защитной голограммы сходным по внешнему виду аналогом ввиду недостаточной изобразительной индивидуальности её дизайна.

Отсюда можно предположить, что существующий идеологический подход к формированию понятия "защитная голограмма" не полностью оправдывает себя и традиционные способы, превращающие изобразительную голограмму в защитную, в настоящее время исчерпали себя и уже не способны в полной мере обеспечить эксклюзивность защитной голограммы.

Для дальнейшего подъема эффективности защитных голограмм, повышения их защитного потенциала, а так же для удобства работы с ними предлагается при организационном построении архитектуры защитных голограмм перенести акценты с защитных элементов микро- и макроуровня, традиционно "спрятанных" внутри голограммы, на хорошо зрительно воспринимаемые и узнаваемые крупноформатные защитные элементы (изображения) обладающие так называемыми публичными признаками (высокая степень узнаваемости у любого вероятного наблюдателя), не требующими для своей идентификации ни особых навыков, ни временных затрат.

В сообщениях [1, 2] уже говорилось, что выдвинутым предложениям по формированию организационного построения защитных голограмм по новым принципам может соответствовать оригинальная разработка комбинированной защитной голограммы совмещающей в себе в себе планарную цифровую и объёмную аналоговую запись изображений.

Настоящее сообщение информирует о ходе работ по дальнейшему совершенствованию комбинированной защитной голограммы, направленное на использование современных возможностей записи цифровых голограмм с объёмным представлением изображения, сочетаемого с объёмным изображением, выполненным по аналоговой технологии.

#### *Список литературы*

1. Яновский А.В. Новый подход к защитной голографии: комбинированная голограмма на основе аналогового изображения 3D-объекта // III Всероссийская конференция по фотонике и информационной оптике. Сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2014.

2. Яновский А.В. Комбинированная защитная голограмма на основе планарной цифровой и объёмной аналоговой записи изображений // Одиннадцатая Международная конференция «ГолоЭкспо-2014». Сб. науч. тр. Сочи, 2014.

А.В. ПАВЛОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## ОБОБЩЕНИЕ СЕРИИ ОБРАЗОВ НАЛОЖЕННЫМИ ГОЛОГРАММАМИ ФУРЬЕ

Исследована связь оценки эффективности выделения общих фрагментов в серии образов, записываемых методом наложенных голограмм Фурье, с взаимной коррелированностью пространственно-модулированных опорных образов.

A.V. PAVLOV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## GENERALIZATION OF PATTERNS SERIES BY SUPERIMPOSED FOURIER HOLOGRAMS

Revealing of common parts of patterns series recorded by superimposed Fourier holograms in dependence of the reference patterns mutual correlation is investigated.

Наложённые голограммы (НГ) применяются при построении памяти [1], включая запись серий образов [2, 3]. Одна из задач обработки информации – обобщение, т.е. выявление в серии общих фрагментов при отсутствии иных, кроме частоты появления, априорных критериев общности.

В статье [4] показано, что задача может быть решена методом НГ Фурье (1), записанных с модулированными опорными образами (рис. 1)

$$H_i v_x = F S_i x F^* R_i x \exp -j2\pi v_x x_i^R + x_i^S, \quad (1)$$

где  $v_x$  – пространственная частота,  $F$  – символ преобразования Фурье, астериск – комплексного сопряжения, экспоненциальный член описывает пространственное положение сигнальных  $S$  и опорных  $R$  образов при записи НГ,  $j$  – мнимая единица. Согласно [4], условия решения задачи:

1) требование на постоянство расстояния между образами  $S_i$  и  $R_i$

$$\forall i, j \in 0, n : x_i^R - x_j^R = x_i^S - x_j^S;$$

2) частичная коррелированность опорных образов.

В данной работе дана связь оценки эффективности выделения общих фрагментов сигнальных образов с коррелированностью опорных образов.

Подход к решению задачи основан на использовании дисперсии как оценки модулированности и свойстве корреляции суммы образов

$$K\left(\sum_{i=1}^n X_i(x,y)\right) = \sum_{i=1}^n K_{ii} X_i(x,y) + \sum_{i \neq j}^n K_{ij} X_i(x,y) X_j(x,y), \quad (2)$$

где  $X_i(x,y)$  –  $i$ -ый образ,  $K_{ij}$  – функция взаимной корреляции  $i$ -го и  $j$ -го образов,  $K_{ii} = D_{ii} L_x L_y$ ,  $D_{ii}$  – дисперсия  $i$ -го образа,  $L_x L_y$  – его размеры. При предъявлении мультиплексной голограмме  $R_i$  она восстановит поле

$$Out\ x = \sum_n S_i^C x + x_i^S * [R_i\ x \otimes R_j\ x] + \sum_n S_j^P x + x_i^S * [R_i\ x \otimes R_j\ x],$$

где верхние индексы обозначают общие для всей серии и частные, т.е. некоррелированные фрагменты, соответственно. Если опорные образы

$$R_i\ x = kR^C\ x + 1-k R_i^P\ x; k \in 0,1, \quad (3)$$

то коэффициент корреляции в первом приближении пропорционален  $k^2$ .

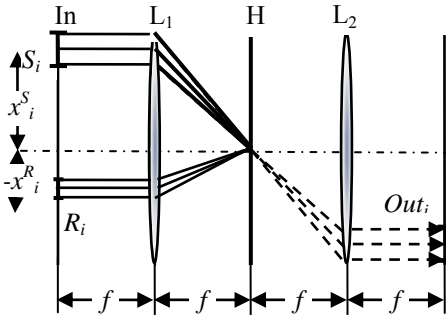


Рис. 1. 4f схема голографии Фурье при записи наложенных голограмм

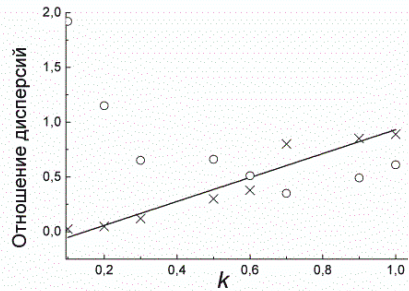


Рис. 2. Зависимости отношения дисперсий (крестики) и ср. квадр. отклонения (кружки) от  $k$ :

Моделировалась запись и восстановление НГ образов – реализаций стационарных случайных процессов для различных  $k$  (3). Оценивались зависимости от числа НГ (до 15) отношения дисперсии восстановленных фрагментов  $S^C$  и  $S^P$  для разных  $k$ . На рис.2 дана зависимость от  $k$  отношения дисперсий, их аппроксимация и средние квадраты отклонения по ансамблю из 10 реализаций для фрагментов восстановленного поля, соответствующих  $S^C$  и  $S^P$  фрагментам. Таким образом, имеем линейную зависимость оценки эффективности выделения от  $k$ , входящего в (3).

Работа поддержана РФФИ, проект 15-01-04111-а.

*Список литературы*

1. Van Heerden P.J. // Applied Optics. 1963. V.2(4). P.387–400.
2. Mager H.J., Wess O., Waidelich W. // Opt. Comm. 1973. V.9(2). P.156-160.
3. Боркова В.Н., Зубов В.А., Крайский А.В. // Опт. и спектр. 1987. Т.63(2). С.384-387.
4. Павлов А.В. Изв. ВУЗов. // Физика. 2015. Т.58(10). С.80-86.



М.С. КОВАЛЕВ, Г.К. КРАСИН, П.И. МАЛИНИНА,  
С.Б. ОДИНОКОВ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Разработан принцип построения датчика волнового фронта на основе голограммных оптических элементов, синтезированных с помощью двумерного быстрого преобразования Фурье.

M.S. KOVALEV, G.K. KRASIN, P.I. MALININA, S.B. ODINOKOV  
*Bauman Moscow State Technical University*

## **WAVEFRONT SENSOR BASED ON THE HOLOGRAPHIC OPTICAL ELEMENTS**

Developed principle of construction of the wavefront sensor, based on the holographic optical elements synthesized by a two-dimensional fast Fourier transform.

Проблема измерения искажений волновых фронтов (ВФ) – общая для многих разделов оптики. Решается эта задача обычно с помощью интерференции. Однако в адаптивной оптике датчики волнового фронта (ДВФ) практически не используют этот подход. На то есть несколько причин: ДВФ должен работать с некогерентными источниками белого света; интерференционные полосы хроматичны; ДВФ должен быть быстрым [1].

Контроль формы ВФ методом Гартмана и его разновидностью – методом Шака-Гартмана – является в настоящее время одним из наиболее простых и вместе с тем точных и эффективных средств. Различие между методами состоит в использовании различных масок, устанавливаемых перед фотодетектором: в классических датчиках Гартмана маски представляют собой растры отверстий малого размера в непрозрачном экране, а в датчиках Шака-Гартмана маски выполняются в виде матриц микролинз с квадратной или круглой апертурой [2].

В настоящей работе предложен альтернативный ДВФ, в котором роль маски играет фоточувствительная пластинка с мультиплексными цифровыми голограммами Френеля (рис. 1). Синтез, численное восстановление, добавление фазовых масок, а также внесение

ограничений числа представления уровней полутонового пропускания таких голограмм осуществляется методом, описанным в [3]. Принцип компьютерного синтеза голограмм Френеля основан на вычислении для каждой точки распределения интенсивности светового поля в плоскости голограммы в соответствии с интегралом Френеля:

$$U(x, y) = \frac{\exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda z_0} z_0\right)}{i \lambda z_0} \tilde{F}^{-1} \left[ \tilde{F}[a(x, y)] \times \tilde{F} \left[ \exp\left(i \frac{\pi}{\lambda z_0} (x^2 + y^2)\right) \right] \right],$$

где символами  $\tilde{F}[\bullet]$  и  $\tilde{F}^{-1}[\bullet]$  обозначены операции прямого и обратного преобразований Фурье. В качестве устройства вывода (рис. 2) голограммы использован жидкокристаллический ПВМС с амплитудным пропусканием. Размерность модулятора составила  $1024 \times 768$  пикселей.

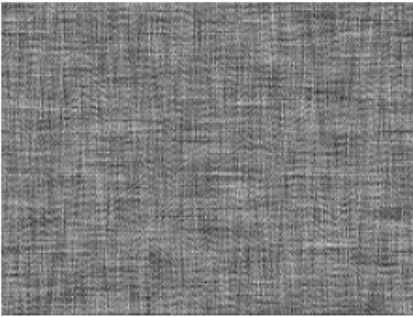


Рис. 1. Фрагмент синтезированной голограммы Френеля

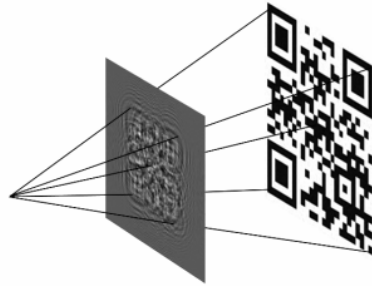


Рис. 2. Схема восстановления компьютерно-синтезированной голограммы Френеля

#### Список литературы

1. Венедиктов В.Ю. Основы адаптивной оптики. Санкт-Петербург: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.
2. Полешук А.Г., Седухин А.Г., Трунов В.И., Максимов В.Г. Датчик Гартмана на основе многоэлементных амплитудных масок с аподизированными апертурами // Компьютерная оптика. 2014. Т.38. №4. С.695-703.
3. A combination of computer-generated Fourier holograms and light guide substrates with diffractive optical elements for optical display and sighting system // Электронный ресурс - <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=DH-2015-DW2A.20>.

В.В. ДЁМИН, Д.В. КАМЕНЕВ

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

## **ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ЧАСТИЦ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

В работе предложен комплекс методов и алгоритмов для автоматического извлечения информации из цифровых голограмм частиц. Выполнена апробация методов на примере планктонных и оседающих частиц, двухфазных потоков.

V.V. DYOMIN, D.V. KAMENEV

*National Research Tomsk State University*

## **EXTRACTING INFORMATION FROM DIGITAL PARTICLES HOLOGRAMS. RESULTS AND PROSPECTS**

Methods and algorithms for automatically information extraction from digital particles holograms are suggested. Approbation of the methods for plankton, sinking particles and two-phase flows is made.

Методы цифровой голографии применяются для изучения мелких частиц, расположенных в объёме среды, таких как аэрозоли [1], двухфазные потоки и оседающие частицы [2], планктон [3, 4], др. Запись видеопоследовательности голограмм позволяет исследовать все зарегистрированные на голограмме частицы в динамике. Использование голографических методов позволяет получить уникальную информацию обо всем зарегистрированном на голограмме объёме с частицами, и выгодно отличается от аналогичных методов исследования частиц.

Зарегистрировать цифровую голограмму частиц в настоящее время сложности не представляет. Напротив, извлечь информацию, при этом сохранить высокую точность, автоматически и в режиме реального времени – задача, которая актуальна, и решается в работе.

По данным, восстанавливаемым из цифровых голограмм, можно определить форму, размер, трёхмерное положение каждой зарегистрированной на голограмме частице, построить распределения частиц по размерам, формам, оценить концентрацию, получить распределение частиц в пространстве и построить трёхмерную траекторию движения. При исследовании крупных частиц, например, планктона, интерес представляют такие параметры, как форма, размер и пространственное положение каждой частицы. В задачах исследования

мелких частиц, например, двухфазные потоки или продукты горения, форма частиц не имеет значения, и её можно считать близкой к кругу или овалу. Для таких частиц наиболее интересными характеристиками являются концентрация и распределение частиц по размерам. Выбор рассчитываемых параметров и методов извлечения информации зависит от поставленной задачи и объектов исследования.

В работе повышение точности расчёта характеристик частиц (размер, форма, пространственное положение) реализовано за счёт комбинации методов обработки изображений (например, медианная фильтрация, контрастирование и гамма-коррекция) [5] и уточнения продольной координаты методом граничного контраста [6]. Автоматизировать процесс извлечения информации предложено за счёт формирования двумерного отображения голографического изображения [7], на котором все частицы объёма заданной глубины сфокусированы.

Тестирование методов выполнено на примере планктона (вид *Daphnia* и *Epishura Baicalensis*), пузырьках воздуха в воде и оседающих в воде частиц песка. Для них получены распределение частиц по размерам, произведена оценка концентрации. Для планктонных частиц дополнительно получены распределение частиц в пространстве и концентрация частиц в слоях. В докладе представлены экспериментальные результаты работы предложенных методов. Рассмотрены пути повышения скорости обработки голографических данных.

#### Список литературы

1. Fugal J.P., Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech. 2009. N2. P.259–271.
2. Katz J., Sheng J. Application of holography in fluid mechanics and particle dynamics // Annu. Rev. Fluid Mechanics. 2010. V.42. P.531-555.
3. Sun H., Benzie P.W., Burns N. Underwater digital holography for studies of marine plankton // Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. V.366. P.1789-1806.
4. Дёмин В.В., Ольшук А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т.21. №12. С.1089-1095.
5. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
6. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Сравнение методов определения плоскости наилучшей фокусировки изображения частицы, восстановленного с цифровой голограммы // Известия вузов. Физика. 2013. Т.56. №7. С.90-97.
7. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Двумерное представление цифрового голографического изображения объема среды с частицами как способ отображения и обработки информации о частицах // Оптический журнал. 2013. Т.80. №7.

**Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.А. КУРБАТОВА, П.А. ЧЕРЁМХИН**  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДЫ СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ О 3D-СЦЕНАХ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Цифровая голография позволяет регистрировать и восстанавливать информацию об объемных сценах. В работе рассмотрены различные существующие типы методов сжатия цифровых голограмм: скалярные, векторные и стандартные.

**N.N. EVTIKHIEV, E.A. KURBATOVA, P.A. CHEREMKHIN**  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **METHODS OF COMPRESSION OF INFORMATION ABOUT 3D-SCENES USING DIGITAL HOLOGRAPHY**

Digital holography allows registration and reconstruction information about the 3D-scenes. In the paper various existing methods of digital holograms compression are considered: scalar, vector and standard types.

Цифровая голография является распространенным инструментом применений в интерферометрии [1], микроскопии [2-3], обработке информации [4], реконструкции сцен [5-6] и др. Развитие характеристик цифровых фото- и видеокамер привело к тому, что размеры файлов голограмм составляют десятки мегабайт. Для передачи голографического видео с частотой фильмов (24 Гц) необходимо иметь канал с пропускной способностью 2-4 Гбит/с, что существенно больше используемой в стандартных каналах связи в настоящее время. Аналогично для хранения такого видео необходимы большие объёмы носителей информации, так как 10 мин видео будет иметь размер более 1 терабайта.

Для повышения скорости передачи голограмм и снижения объёмов архивной памяти, требуемой для их хранения, можно проводить сжатие голограмм. Данная задача актуальна для:

- систем 3D-наблюдения (охранные системы [5]; регистрация фауны океанов; восстановление объёмных сцен удаленно, в том числе регистрируемых в агрессивных средах);
- медицинских применений (томография, наблюдение за состоянием органов человека) [3];
- интерферометрии [1];

- микроскопии (отслеживание микрообъектов, эритроцитов; анализ клеток [2]);

- метрологии.

В настоящее время предлагаются следующие типы методов сжатия цифровых голограмм [7]:

- основанные на стандартах изображений и видео (JPEG, MPEG-4 и др.),
- скалярные (неравномерное логарифмическое сжатие и др.),
- векторные (метод динамических ядер).

Первая группа основана на статистических параметрах изображений и особенностях визуального восприятия человеком. Однако в случае голограмм эти методы значительно менее пригодны, так как снимки направлены на регистрацию амплитуды волны, а голограммы направлены в большей степени на сохранение фазы; наиболее важно качество именно восстановления, а не визуальное восприятие голограммы. Поэтому для цифровых голограмм алгоритмы сжатия с потерями (например, JPEG) обычно не пригодны. Можно использовать сжатие без потерь (например, алгоритм LZW), однако это позволяет уменьшать файл цифровой голограмм обычно до 2 раз [6].

При скалярном сжатии каждое входное значение преобразуется в одно квантованное выходное без учёта зависимости между значениями сигнала. Векторные методы основаны на алгоритмах обучения и нейронных сетях и направлены на создание книги значений соответствия уровню сжатия данной голограммы. В результате скалярные методы сжатия голограмм обычно имеют наиболее высокое быстродействие, но низкое качество восстановления, а векторные – наиболее низкое быстродействие и высокое качество восстановленных изображений.

#### *Список литературы*

1. Monroy-Ramirez F., et al. Monitoring micro-mechanical changes in electronic circuit boards with digital holographic interferometry // *Optik*. 2014. V.125. P.2113-2116.
2. Molder A., et. al. Non-invasive, label-free cell counting and quantitative analysis of adherent cells using digital holography // *Journal of Microscopy*, 2008. V.232. №2. P.240-247.
3. Bianco V., et. al. Clear microfluidics imaging through flowing blood by digital holography // *IEEE Journal of. Selected Topics Quantum Electron*. 2014. V.20, Is.3. P.6636048.
4. Schnars U., et al. *Digital Holography and Wavefront Sensing*. Springer, Berlin, 2015.
5. Locatelli M., Pugliese E., Paturzo M., et al. Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography // *Optics Express*. 2013. V.21. Is.5. P.5379-5390.
6. Bruylants T., Blinder D., Ottevaere H., Munteanu A., Schelkens P. Microscopic off-axis holographic image compression with JPEG 2000 // *Proc. SPIE*. 2014. V.9138. P.91380F.
7. Kurbatova E.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of compression of digital holograms // *Physics Procedia*. 2015. V.73. P.328–332.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ВХОДНЫХ АМПЛИТУДНЫХ МАСОК В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕННЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ**

Предложены методы использования входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением для повышения отношения сигнал/шум в декодированных изображениях, а так же для повышения визуальной скрытности кодированных изображений.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **APPLICATION OF INPUT AMPLITUDE MASKS IN SCHEME OF OPTICAL IMAGE ENCRYPTION WITH SPATIALLY-INCOHERENT ILLUMINATION**

Methods of application of input amplitude masks in scheme of optical image encryption with spatially-incoherent illumination are proposed. Methods are used for increasing of signal-to-noise ratio in decrypted images and enhancing the optical encryption security for encoded images.

В настоящее время активно развиваются методы оптического кодирования информации. Методы, использующие пространственно-некогерентное освещение, обладают рядом существенных преимуществ.

Для повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) в декодированном изображении и повышения визуальной скрытности кодированного изображения разработаны две группы методов применения входных амплитудных масок (АМ): разрежения и взаимодополняющих масок.

Методы разрежения основаны на наложении на кодируемое изображение АМ в виде бинарной двумерной решётки или её создания путём разрежения исходного изображения. Наложение решётки приводит к мультиплицированию спектра изображения. При декодировании это сохраняет большее количество информационных частот.

На рис. 1 представлен результат применения АМ. Эффективность метода оценивалась по увеличению ОСШ по сравнению с кодированием без АМ. По оси абсцисс отложено отношение величины пика на нулевой пространственной частоте в спектре ключа к среднему уровню его

спектра (ОПС). Данный параметр прямо коррелирует со стойкостью ключа.

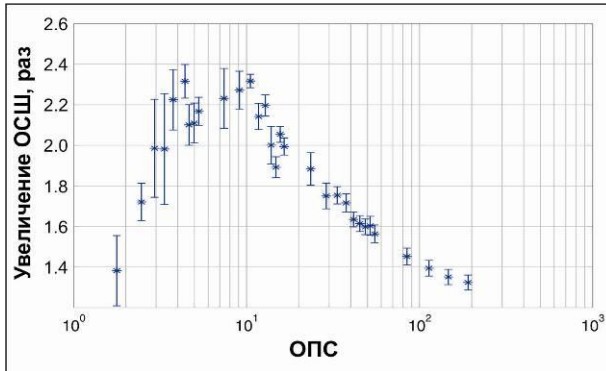


Рис. 1. Зависимость величины увеличения отношения сигнал/шум при применении входной АМ по сравнению с кодированием без АМ от ОПС ключей кодирования

Наиболее эффективный метод группы разрежения показал среднее увеличение ОСШ по сравнению с кодированием без АМ в 2 раза.

Возможно совместное использование методов разных групп с целью обеспечения одновременного увеличения ОСШ и повышения визуальной скрытности. На рис. 2 представлены примеры кодированных и декодированных изображений.

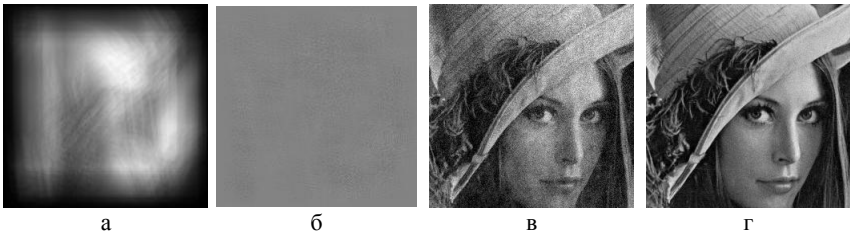


Рис. 2. Кодированные изображения: без АМ (а) и с их использованием (б), фрагменты соответствующих декодированных изображений: без АМ (в), с АМ (г)

Результаты проведенных численных экспериментов демонстрируют, что визуальная скрытность при использовании амплитудных масок увеличивается более чем в 10 раз, отношение сигнал/шум увеличивается в среднем в 2 раза.



А.А. ЧИПЕГИН, С.Э. ПУТИЛИН, Н.В. ПЕТРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ГОЛОГРАФИЯ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХБЫСТРЫХ ПРОЦЕССОВ**

В данной работе рассматривается фемтосекундная внеосевая схема цифровой голографии сфокусированного изображения для исследования сверхбыстрых процессов.

A.A. CHIPEGIN, S.E. PUTILIN, N.V. PETROV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **FOCUSED IMAGE HOLOGRAPHY FOR STUDYING ULTRAFAST PROCESSES**

In this paper we consider femtosecond off-axis focused image digital holography for ultrafast processes characterization.

Цифровая голография с разрешением во времени применяется в различных областях науки и техники т.к. позволяет характеризовать сверхбыстрые процессы, позволяет осуществлять структурный анализ различных поверхностей, например, тонких плёнок [1], и произведений искусства [2]. Ключевой особенностью цифровой голографии с разрешением во времени является возможность измерения фазового набега с высоким временным разрешением.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В качестве источника использовалась лазерная система на титан-сапфире с центральной длиной волны 800 нм, частотой повторения импульсов 1 кГц, энергией 2.3 мДж и длительностью 30 фс. С помощью светоделителя BS1 излучение делится на два плеча: накачку и плечо голографической внеосевой конфигурации. Светоделитель BS2 делит излучение на опорный и объектный пучки. Для увеличения изображения используется телескопическая система с коэффициентом увеличения  $M = 3.3$ , состоящая из линз L2 и L3. Линия задержки Delay 1 обеспечивает контроль над временной динамикой исследуемого периодического процесса с высокой точностью. Линия задержки Delay 2 позволяет смещать узкую пространственную область интерференции опорного и предметного пучков, осуществляя сканирование по всей области записи

голограммы. Для регистрации голограмм используется камера NIKON D7000, сенсор которой обладает достаточной чувствительностью к длине волны пробного излучения. Обработка голограмм производилась методом [3].

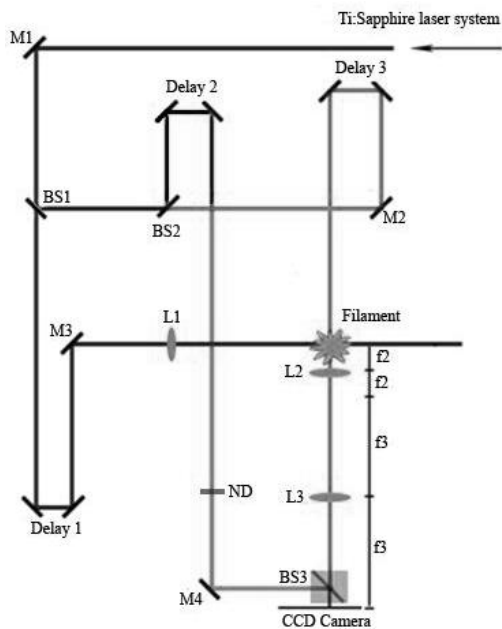


Рис. 1. Схема эксперимента

Произведены оценки временного разрешения системы и влияния на него диспергирующих элементов в голографической схеме.

Система была апробирована в исследовании динамического изменения показателя преломления воздуха в процессе филаментации лазерного излучения в пучке накачки.

#### *Список литературы*

1. Štaulys N., Gallais L., Melninkaitis A. Direct holographic imaging of ultrafast laser damage process in thin films // *Optics Letters*. 2014. V.39(7). P.2164.
2. Tornari V., Zafirooulos V., Bonarou A., Vainos N.A., Fotakis C. Modern technology in artwork conservation: a laser-based approach for process control and evaluation // *Optics and Lasers in Engineering*. 2000. V.34. P.309-326.
3. Белашов А.В., Петров Н.В., Семёнова И.В. Метод вычисления динамического фазового набег в голографической интерферометрии без ликвидации фазовых разрывов // *Компьютерная оптика*. 2014. Т.38. №.4. С.710-716.

В.В. ДЁМИН, А.С. КОЗЛОВА

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАММЕ БЕЗ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВИОЛЫ-ДЖОНСА**

Предложен метод определения положения отдельных планктонных частиц на голограмме без ее восстановления на основе метода Виолы-Джонса. Представлены примеры работы этого метода.

V.V. DYOMIN, A.S. KOZLOVA

*National Research Tomsk State University*

## **POSITION DETERMINATION OF PARTICLES IN HOLOGRAM BASED ON VIOLA-JONES METHOD WITHOUT RECONSTRUCTION PROCESS**

The method for determining the position of the individual plankton particles in hologram without reconstruction based on Viola-Jones method is considered. The results of method work are presented.

Актуальность задачи исследования планктонных частиц обусловлена тем, что они являются важнейшими компонентами морских экосистем, представляют собой ключевое звено пищевых цепей океанов и пресных вод, а также являются индикатором экологического состояния пелагиали. Поэтому необходимым является определение количественного состава планктонного сообщества и его видового состава. Для исследования частиц голографическим методом используются погружаемые камеры [1]. Они позволяют получать различную информацию об исследуемых частицах в результате восстановления зарегистрированных голограмм, а также обработки восстановленных изображений.

В данной работе предложен алгоритм выделения планктонных частиц на голограмме без ее восстановления на основе метода Виолы-Джонса. Метод Виолы-Джонса [2], широко применяемый в компьютерном зрении, основывается на следующих принципах: использование интегральных представлений изображений, использование признаков Хаара (на основе вейвлетов Хаара), при помощи которых осуществляется поиск объектов, мета-алгоритм машинного обучения AdaBoost, а также используются

каскады признаков для быстрого отбрасывания областей, в которых объект был не найден.

Для обучения алгоритма Виолы-Джонса использовались две тестовые выборки изображений: выборка из 250 фрагментов цифровых голограмм, содержащих голограмму планктонной частицы, и выборка из 300 фрагментов голограмм без частицы. В процессе обучения создавалась обученная база знаний слабых классификаторов. Производилось сканирование голограммы с ансамблем частиц на нескольких масштабах методом скользящего окна. Результат работы алгоритма представляет собой множество прямоугольников, определяющих положение отдельных планктонных частиц на голограмме, как это показано на рис. 1.

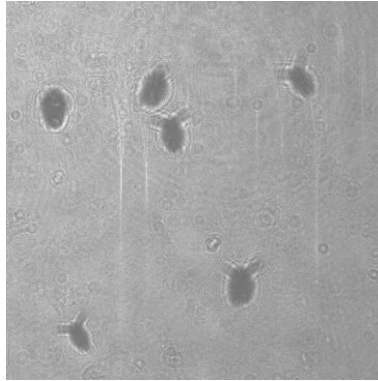


Рис. 1. Результат работы алгоритма Виолы-Джонса на цифровых голограммах планктонных частиц

Рассмотренный в данной работе алгоритм выделения планктонных частиц на голограмме без ее восстановления может применяться для быстрой оценки количества планктонных частиц, присутствующих на голограмме, а также для ее дальнейшей сегментации с целью восстановления индивидуальных голограмм частиц и их детального анализа.

#### *Список литературы*

1. Dyomin V.V., Olshukov A.S. Digital holographic video for studying biological particles // J.Opt. Technol. 2012. V.79. P.344-347.
2. Viola P., Jones M.J. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features // Proceedings IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2001). 2001.

С.А. САВОНИН, В.П. РЯБУХО

*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

**ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРИ ЧИСЛЕННОЙ КОРРЕКЦИИ МИКРОНАКЛОНОВ  
ОБЪЕКТА В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ  
ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Применение техники математического моделирования при обработке голограмм обеспечивает эффективный расчет корректирующих фазовых множителей, используемых для устранения сторонних фазовых сдвигов от микронаклонов объекта как целого при приложении к ним механической нагрузки.

S.A. SAVONIN, V.P. RYABUKHO

*Saratov State University*

**APPLICATION OF MATHEMATICAL SIMULATION  
FOR NUMERICAL OBJECT MICRO-INCLINATION  
CORRECTION IN DIGITAL HOLOGRAPHIC  
INTERFEROMETRY**

Application of mathematical modeling techniques in holograms processing provides effective calculation of the phase correction coefficients used to eliminate additional phase shift for objects micro-inclination when they are subject to mechanical influence.

Микронаклоны объектов как целого, при их исследовании методами голографической интерферометрии [1, 2], приводят к значительным изменениям структуры интерференционных полос, что ограничивает возможности качественного и количественного анализа формируемых интерферограмм. Процедура численной коррекции фазовых сдвигов от микронаклонов заключается в перемножении комплексной амплитуды объектного поля нагруженного состояния объекта и корректирующего экспоненциального множителя  $\exp[i\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)]$ , при этом аналитическое выражение фазового вклада  $\Delta\varphi_D(\vec{\rho}_0)$  определяется геометрией поверхности объекта и схемы записи голограммы.

Применение техники математического моделирования дает возможность в численном виде воспроизвести процедуры записи голограммы и восстановления с нее поля изображения объекта, что обеспечивает получение предварительной информации об особенностях

пространственного распределения полос голографической интерферограммы (рис. 1) до постановки натурального эксперимента. Корректно построенная математическая модель позволяет рассчитать множитель  $\Delta\varphi_D(\vec{r}_0)$ , использующийся при компенсации фазовых вкладов от микронаклонов объекта на экспериментальных интерферограммах (рис. 2). Модель дает возможность качественно оценить эффективность процедуры устранения таких фазовых сдвигов, а также получить дополнительную информацию о качественных и количественных особенностях влияния «паразитного» фазового сдвига на характер картины интерференционных полос от деформационного смещения поверхности объекта.

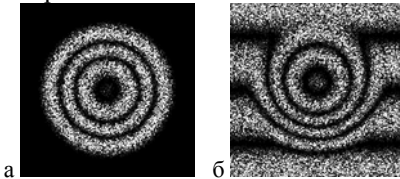


Рис. 1. Смоделированные спекл-модулированные интерферограммы: упругий прогиб мембраны под действием сосредоточенной силы (а); прогиб, совмещенный с микронаклоном объекта относительно горизонтальной оси (б)

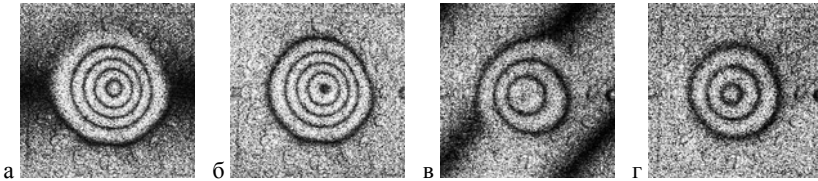


Рис.2. Устранение фазовых вкладов от микронаклона на экспериментальных интерферограммах прогиба мембраны: наклон объекта как целого вокруг горизонтальной оси (а); результат коррекции (б); наклон объекта относительно вертикальной и горизонтальной осей одновременно (в); результат коррекции (г)

Таким образом, показано, что внесение на этапе формирования голографической интерферограммы в комплексную амплитуду объектного поля корректирующей разности фаз, рассчитанной методами математического моделирования, приводит к эффективному устранению фазовых вкладов от микронаклонов объектов как целого. Это дает возможность сформировать интерферограмму чисто деформационного смещения поверхности, соответствующего исследуемому внешнему воздействию.

#### Список литературы

1. Kreis T. Handbook of holographic interferometry. Optical and digital methods. Wiley, 2005.
2. Диков О.В., Савонин С.А. и др. // Компьютерная оптика. 2012. Т.36. №1. С.51-64.

Д.В. МОСЕЙКО, Б.Г. МАНУХИН, О.В. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕРНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СРЕДАХ**

Рассмотрены процессы, сопровождающие запись голограмм в полимерных регистрирующих средах. Даны количественные оценки изменения температуры образца при его экспонировании и прослежена временная динамика изменения, как температуры образца, так и его пропускания. Даны рекомендации по снижению температурных эффектов, сопровождающих запись голограмм.

D.V. MOSEYKO, B.G. MANUKHIN, O.V. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **THERMAL EFFECTS IN POLYMER HOLOGRAPHIC MEDIA**

Presents processes accompany the record holograms in polymer recording media and quantitative evaluation of temperature changes in the sample during of expose. Traced dynamics of thermal and optical parameters changes. Given recommendations to reduce influence of these effects in samples during recoding hologram process.

Процесс записи голограмм в полимерных регистрирующих средах сопровождается нагревом образца, что приводит к изменению его геометрических размеров и среднего показателя преломления, как в области воздействия излучения, так и за ее пределами. Изменение характеристик образца за счет нагрева во время экспонирования может повлиять на параметры регистрируемых голограммных оптических элементов и исказить записываемую информацию.

В качестве объекта исследования в работе использован светочувствительный полимерный материал «Диффен», представляющий собой твердый раствор органического красителя (фенантренхинон – ФХ) в полиметилметакрилате (ПММА) [1]. Запись голограмм с пространственной частотой  $350 \text{ мм}^{-1}$  производилась излучением ионного аргонового лазера ( $\lambda=488 \text{ нм}$ ) на голографическом стенде. Область экспонирования составляла 10 мм при диаметре образца 40 мм.

Для оценки изменения температуры образца использовалась тепловизионная камера, которая позволяет осуществлять непрерывный контроль температуры образца с точностью  $\approx 0,1^\circ\text{C}$ .

На рис.1а приведены экспериментальные данные изменения температуры образца в области регистрации голограммы и за ее пределами. Как видно, изменение температуры максимально в центре голограммы и составляет (3-4)К в указанное время экспозиции; изменение температуры, которое происходит за пределами голограммы, также зависит от времени экспонирования.

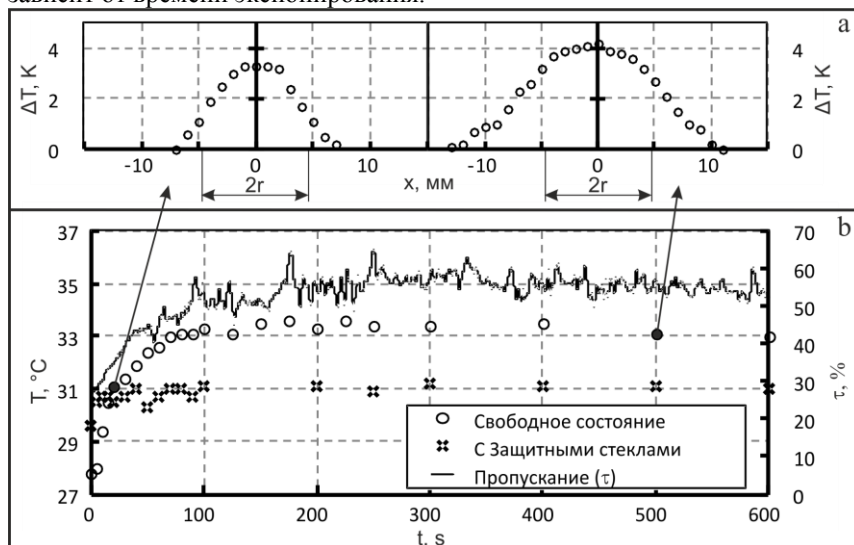


Рис.1. Изменение температуры образца в области регистрации голограммы ( $2r$ ) и за ее пределами через 20с (слева) и 500с (справа) (а); изменение температуры образца в области записи голограмм в cassette с защитными стеклами и без них, и пропускания образца при его экспонировании (б)

На рис.1б приведены экспериментальные данные изменения температуры образца и его пропускания в процессе экспонирования (регистрация голограммы). Как видно, при установке образца в cassette между защитными стеклами изменение температуры при регистрации голограммы почти в два раза меньше, чем без использования защитных стекол. Таким образом, одним из путей снижения температурных эффектов при записи голограмм является использование защитных стекол в конструкции крепления образца.

#### Список литературы

1. Andreeva O.V., Bandyuk O.V. Light-sensitive media-composites for recording volume holograms based on porous glass and polymer // Holograms - Recording materials and Applications. 2011. P.45-70.



А.Ю. БЕТИН, Я.А. ГРАД, В.В. НИКОЛАЕВ,  
С.Б. ОДИНОКОВ, А.Б. СОЛОМАШЕНКО

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

## **ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ ИНДИКАТОР НА ОСНОВЕ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК**

Рассмотрена возможность использования в схеме голографического индикатора для отображения знаково-символьной информации рельефно-фазовых дифракционных решеток, полученных на тонких гибких пленках, что облегчает возможность их серийного производства методом тиражирования.

A. Yu. BETIN, Ya. A. GRAD, V. V. NIKOLAEV,  
S. B. ODINOKOV, A. B. SOLOMASHENKO

*Bauman Moscow State Technical University*

## **HOLOGRAPHIC INDICATOR BASED ON RELIEF-PHASE DIFFRACTION GRATINGS**

The possibility of use the diffraction gratings recorded on thin flexible films for scheme of holographic signs-symbolic display is described. This approach facilitates the production of grating by replication method.

Дисплеи и индикаторы на основе световодных пластин и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) становятся на данный момент важной частью многих систем отображения информации, где наблюдаемое изображение накладывается на изображение реальной сцены. Преимуществом систем отображения информации на основе ДОЭ является то, что они обеспечивают выходной зрачок большого размера при сравнительно малом размере коллимирующей оптической системы, что позволяет снизить массогабаритные параметры голографического дисплея или индикатора [1-3].

Схема голографического индикатора знаковосимвольной информации содержит OLED-дисплей, коллимирующий объектив, световодную пластинку, отражательную дифракционную решетку для ввода излучения и дифракционные решетки переменной дифракционной эффективности для вывода излучения из пластинки в зрачок наблюдателя [1-2].

Отражательная дифракционная решетка является объемной, т.е. обладает спектральной селективностью, а значит - вводит в пластинку излучение, определенного спектрального состава, т.е. выполняет функции

спектрального фильтра, что позволяет использовать OLED-дисплей с широким спектром излучения в качестве источника формирования знакосимвольной информации без ухудшения оптических характеристик устройства.

Особенностью схемы является то, что дифракционные решетки для вывода излучения из пластинки являются рельефно-фазовыми решетками, полученными на гибких прозрачных пленках, наклеенных на поверхность световодной пластины, что существенно упрощает процесс и снижает стоимость их изготовления. Проведенные экспериментальные исследования и измерения параметров полученных решеток подтвердили возможность их использования в схеме голографического индикатора знакосимвольной информации.

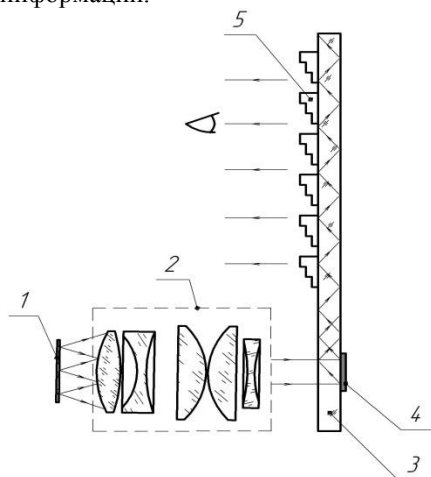


Рис. 1. Схема голографического индикатора знакосимвольной информации:  
1 - OLED-дисплей, 2 - коллимирующий объектив, 3 - световодная пластина,  
4 - отражательная объемная решетка, 5 - рельефно-фазовые решетки на гибких пленках

#### Список литературы

1. Eisen L., Meyklyar M., Golub M., Friesem A., Gurwich I., Weiss V. Planar configuration for image projection // *Applied optics*. 2006. V.45. No.17.
2. Odinkov S., Markin V., Kuznetsov A., Drozdova E., Solomashenko A. The optical scheme for recording of miniature light guide holographic indicator // *Proc. of SPIE*. 2013. V.8776. P.87760Q.
3. Cameron A. Optical waveguide technology & its application in head mounted displays // *Proc. of SPIE*. 2012. V.8383. P.83830E.

В.Е. РОГАЛИН<sup>1,2</sup>, Е.Е. АШКИНАЗИ<sup>3,4</sup>, А.Ф. ПОПОВИЧ<sup>3</sup>,  
В.Г. РАЛЬЧЕНКО<sup>3,4</sup>, В.И. КОНОВ<sup>3,4</sup>, В.Г. КАМЕНЕВ<sup>5</sup>,  
С.М. АРАНЧИЙ<sup>1</sup>, М.В. РУЗИН<sup>6</sup>, С.А. УСПЕНСКИЙ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Москва

<sup>2</sup>Тверской государственной университет

<sup>3</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>5</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики, Москва

<sup>6</sup>ООО «Ламет», Москва

## ПОВЕДЕНИЕ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПЛОТНОСТЯХ МОЩНОСТИ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Экспериментально исследована стойкость водоохлаждаемого окна из поликристаллической алмазной пластины в луче непрерывного 10-ти кВт волоконного лазера при облучённых зонах  $\varnothing$  4 мм и  $\varnothing$  0,4 мм. Получены тепловизионные изображения окна под световой нагрузкой. Показано, что прошедший луч не искажается при плотности мощности до 7 МВт/см<sup>2</sup>, и эффект тепловой линзы несущественен, хотя перепад температур между центром окна и краем мог составлять сотни градусов.

V.E. ROGALIN<sup>1,2</sup>, E.E. ASHKINAZI<sup>3,4</sup>, A.F. POPOVICH<sup>3</sup>,  
V.G. RAL'CHENKO<sup>3,4</sup>, V.I. KONOV<sup>3,4</sup>, V.G. KAMENEV<sup>5</sup>,  
S.M. ARANCHII<sup>1</sup>, M.V. RUZIN<sup>6</sup>, S.A. USPENSKII<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysika, Moscow

<sup>2</sup>Tver State University

<sup>3</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

<sup>4</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>5</sup>All-Russia Research Institute of Automatics, Moscow

<sup>6</sup>Lamet ltd, Moscow

## THE BEHAVIOR OF WATER-COOLED POLYCRYSTALLINE DIAMOND OPTICAL COMPONENTS AT EXTREMELY HIGH POWER DENSITY C.W. LASER IRRADIATION

The heating process and optical distortions of a water-cooled polycrystalline diamond window irradiated with a 10 kW c.w. fiber laser (spot size of  $\varnothing$  4 mm and  $\varnothing$  0.4 mm) are studied experimentally. The dynamics of the window heating was monitored with a thermal imager. No laser beam distortion was observed at power

density of up to  $7 \text{ MW/cm}^2$ , and detrimental thermal lens effect is not essential even for the center-edge temperature difference of hundreds degrees.

В силу уникального сочетания оптических и теплофизических свойств алмаз является удачным материалом для силовой оптики [1]. В работе мы исследовали воздействие сфокусированного излучения 10-киловаттного лазера ( $\lambda=1,07 \text{ мкм}$ ) на водоохлаждаемое окно из поликристаллического CVD-алмаза (ПА). Использовали пластины из ПА  $\varnothing 25 \times 1,3 \text{ мм}$  с коэффициентом поглощения  $\beta_{1,07} \sim 0,45 \text{ см}^{-1}$ , что в 5-10 выше, чем  $\beta_{10,6}$ , т.е. термооптические эффекты соответствовали воздействию непрерывного  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью несколько десятков кВт. Регистрировали распределение излучения, прошедшего через окно, и динамику распределения температур в пределах окна (тепловизором) при размерах облученных зон  $\varnothing 4 \text{ мм}$  и  $\varnothing 0,4 \text{ мм}$  и времени экспозиции до 10 с. Мощность лазера на образце постепенно повышали от 1 до 9 кВт. При большем пятне  $\varnothing 4 \text{ мм}$  нагрев носит линейный характер, при фокусировке в пятно  $\varnothing 0,4 \text{ мм}$  получена нелинейная зависимость разогрева центра диска ( $T_{\text{max}}$ ) от мощности излучения  $P$ . При подобранном режиме охлаждения качество прошедшего луча не ухудшалось при плотностях до  $7 \text{ МВт/см}^2$ , что позволяет корректировать тепловую линзу.

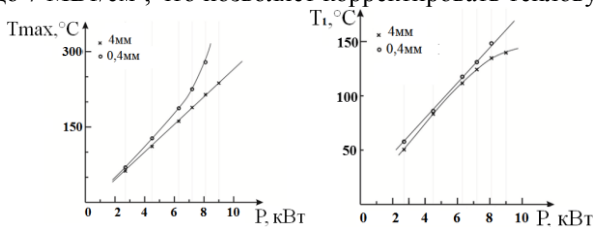


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры  $T$  разогрева окна от мощности  $P$  в пятнах с  $\varnothing 4 \text{ мм}$  и  $\varnothing 0,4 \text{ мм}$ ,  $T_{\text{max}}$  - разогрев в центре,  $T_1$  - Разогрев в 3 мм от центра

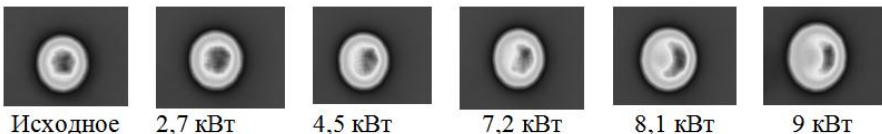


Рис. 2. Распределение интенсивности прошедшего излучения в случае пониженного расхода воды – 2 л/мин при пятне  $\varnothing 0,4 \text{ мм}$  и мощности 2,7; 4,5; 7,2; 8,1 кВт за время 10 с и 9 кВт за время 5 с

#### Список литературы

1. Рогалин В.Е., Ашкинази Е.Е., Попович А.Ф. и др. Стойкость алмазной оптики в луче мощного волоконного лазера // Материалы электронной техники. 2011. №3. С.41-44.

С.А. МАРЦЫНЮКОВ, В.В. ЧЕРНИГОВСКИЙ,  
Д.К. КОСТРИН, А.А. ЛИСЕНКОВ<sup>1</sup>

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ НАГРЕВА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

В работе рассмотрен метод исследования кинетики структурно-фазовых переходов в материалах при их нагреве лазерным излучением.

S.A. MARTSINUKOV, V.V. CHERNIGOVSKIY,  
D.K. KOSTRIN, A.A. LISENKOV<sup>1</sup>

*Saint Petersburg State Electrotechnical University  
<sup>1</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS, Saint Petersburg*

## **RESEARCH OF PHASE TRANSFORMATIONS IN MATERIALS USING HEATING BY LASER RADIATION**

This paper presents a method of research of structural-phase transition kinetics in materials when using heating by laser radiation.

В работе использовался комплекс (рис.1), разработанный для исследования физико-химических свойств материалов [1]: прямого наблюдения и измерения температуры структурно-фазовых превращений. Образец устанавливается на предметном столике, в качестве нагревательного блока выступает модернизированный СО<sub>2</sub>-лазер с возможностью регулировки мощности излучения. Для направления и фокусировки луча используется система зеркал и линз.

Система теплового воздействия на образец [2] предусматривает как непрерывный, так и импульсный режимы работы молекулярного лазера. Импульсный режим работы обеспечивается системой электромагнитного управления. Микроскоп позволяет вести визуальное наблюдение за превращениями в исследуемом образце, обусловленными ростом температуры. Блок регистрации экспериментальных данных реализован в виде программы, благодаря которой по значениям выходного сигнала пирометра определяются значения температуры исследуемого образца. Программа позволяет представлять одновременно результаты

исследования в виде зависимости температуры от времени и изменение поверхности исследуемого образца во время исследования.

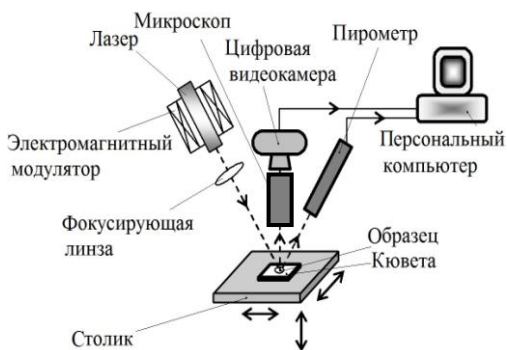


Рис. 1. Измерительный комплекс для визуально-термического исследования фазовых превращений

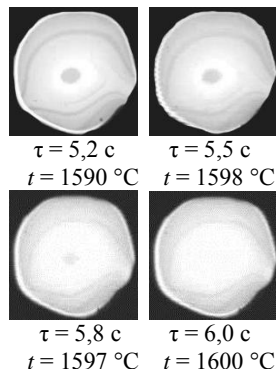


Рис. 2. Фотографии нагрева образца  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Для отработки методики проводились визуально-термические исследования фазовых превращений в неорганических материалах: магнитном железняке  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и его двойном диоксиде  $\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; пентаоксиде диниобия  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ; амфотерном оксиде титана  $\text{TiO}_2$ ; сульфате калия  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . При исследованиях фазовых переходах необходимо правильно выбирать режим нагрева и четко фиксировать температуру фазового перехода. В качестве примера приведена динамика разогрева образца  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (рис. 2) при использовании нагрева управляемым углекислотным лазером. По результатам исследования было установлено, что при использовании внешнего источника излучения с плотностью мощности на образце не менее  $2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$  и управляемым характером излучения можно исследовать кинетику структурно-фазовых переходов материалов с температурой плавления свыше  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , при этом верхний предел температуры исследований определяется температурой, обеспечиваемой источником, а точность измерений зависит в основном от значения внутренней энергии, которое получается или выделяется веществом в форме теплоты при фазовом превращении.

#### Список литературы

1. Шестаков Я. Теория термического анализа. Физико-химические свойства твердых неорганических веществ. М.: Мир, 1987.
2. Либиссон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). СПб: СПб ГУ ИТМО, 2011.

В.П. ВЕЙКО, Ю.Ю. КАРЛАГИНА, Г.В. ОДИНЦОВА,  
Э.И. АГЕЕВ, Я.М. АНДРЕЕВА, В.В. РОМАНОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СПЕКТРОВ  
ОТРАЖЕНИЯ ОТ УГЛА ПАДЕНИЯ СВЕТА  
НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛОВ,  
ОКИСЛЕННУЮ ВОЛОКОННЫМ ЛАЗЕРОМ**

В настоящей работе приведены результаты исследований спектров отражения при различных углах падения света на поверхности нержавеющей стали и технического титана, окисленных излучением волоконного иттербиевого лазера наносекундной длительности импульсов. Показано, что смещение максимумов спектров отражения образцов, полученных при лазерном воздействии, в УФ область больше, чем для образцов, полученных при изотермическом воздействии. Этот факт объясняется наличием рельефа, возникающего при лазерной обработке поверхности.

V.P. VEIKO, Yu. Yu. KARLAGINA, G.V. ODINTSOVA,  
E.I. AGEEV, Ya.M. ANDREEVA, V.V. ROMANOV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

**INVESTIGATION OF REFLECTANCE SPECTRA  
DEPENDENCE ON LIGHT INCIDENCE ANGLE  
FOR METAL SURFACE OXIDIZED BY FIBER LASER**

Reflectance spectra of stainless steel and titanium oxidized by fiber ytterbium laser radiation with nanosecond duration of pulses are measured for different incidence angles. Movement of reflectance spectrum maxima to UV region is higher for samples after laser treatment than after isothermal heating. It is due to the formation of surface relief during laser treatment.

В работе представлены результаты исследований, проводимых в рамках разработки технологии цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) металлов, основанной на эффекте лазерного окисления поверхности[1]. Использование луча лазера в качестве источника тепла позволяет локально инициировать процесс окисления поверхности и контролировать толщину растущего оксидного слоя, что в свою очередь, открывает возможности формирования цветного износостойкого изображения с высоким разрешением непосредственно на поверхности изделия.

В наших предыдущих работах [2,3] предложен метод определения полной палитры возможных цветов на определенном металле. Показано, что в некоторых случаях на цвет поверхности влияют не только режимы лазерного воздействия, но и угол наблюдения. Это явление представляет собой особый интерес, так как управление процессом формирования структур, обладающих свойством изменения цвета при разных углах наклона поверхности, может помочь найти новые применения для технологии ЦЛМ, например, для защиты от фальсификации продукции. Поэтому в настоящей работе проведены спектрофотометрические исследования колориметрических характеристик образцов, полученных при окислении поверхности нержавеющей стали и технического титана в кислородосодержащей среде изотермическим способом (в печи) и при лазерном окислении. Показано, что смещение максимумов спектров отражения образцов, полученных при лазерном воздействии, в УФ область больше, чем для образцов, полученных при изотермическом воздействии. Этот факт объясняется наличием рельефа, возникающего при лазерной обработке поверхности.

Измерение спектров отражения от угла падения света было выполнено на спектрофотометре Lambda 1050 с интегрирующей сферой на базе The Centre for Optical and Laser Materials Research at St. Petersburg State University.

#### *Список литературы*

1. Вейко В.П., Горный С.Г., Одинцова Г.В., Карлагина Ю.Ю., Логинов А.В., Скуратова А.Л. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов // Фотоника. Москва: ЗАО "РИЦ"Техносфера", 2013. Вып.6. С.34-44.
2. Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Yu., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // OpticsExpress. 2014. V.22. Is.20. P.24342-24347.
3. Veiko V., Odintsova G., Gorbunova E., Ageev E., Shimko A., Karlagina Yu., Andreeva Ya. Development of complete color palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of color laser marking technology. 2015. doi:10.1016/j.matdes.2015.10.030.



А.А. ЧИСТЯКОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ,  
Ю.А. КУЗИЩИН, В.А. КРИВЕНКОВ, Ю.А. МИТЯГИН<sup>1</sup>,  
И.Н. ПИРЯЗЕВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФОТОТОКА И МОЩНОСТИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОТОПРОВОДЯЩИХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ LT-GaAs ОТ ГЕОМЕТРИИ ФОКУСИРОВКИ И ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

Представлены результаты экспериментального исследования влияния местоположения пятна фокусировки и плотности мощности излучения фемтосекундного (ФС) лазера в межэлектродном промежутке фотопроводящей антенны (ФПА) LT-GaAs на величину фототока и на среднюю мощность генерации ТГц излучения в течение импульса длительностью 5 мс. Показано, что максимум фототока наблюдается при приближении центра пятна ФС излучения к середине межэлектродного промежутка, а максимум средней мощности ТГц излучения происходит при сдвиге центра пятна ФС излучения на 30 мкм в сторону положительного электрода ФПА. Показано, что для эффективной ТГц генерации необходима достаточная плотность фотоносителей, которая обеспечивается плотностью мощности ФС излучения на поверхности ФПА  $\sim 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

A.A. CHISTYAKOV, K.I. KOZLOVSKII, G.E. KOTKOVSKII,  
Yu.A. KUZISHCHIN, V.A. KRIVENKOV, Yu.A. MITYAGIN<sup>1</sup>,  
I.N. PIRYAZEV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **A STUDY OF PHOTOCURRENT AND A THz RADIATION POWER OF THE PHOTOCONDUCTIVE ANTENNA BASED ON LT-GaAs DEPENDENCE ON THE FOCUSE AND FEMTOSECOND LASER PULSE PARAMETERS**

An experimental study of the influence the intensity and location of femtosecond (FS) laser beam focus spot in the electrode gap of the photoconductive antenna LT-GaAs on the photocurrent and the average THz power during 5 ms of laser irradiation has been investigated. It is shown the maximum value of the photocurrent corresponds the position of FS laser spot in the middle of the electrode gap, and the

maximum value of the average THz power corresponds the position of FS laser spot shifted from the middle of the electrode gap to the positive electrode. To generate THz radiation with high efficient there are enough amount of photo generated carries on the surface of photoconductive antenna that corresponds intensity of  $10^9$  W/cm<sup>2</sup>.

В настоящее время широко проводятся работы над созданием и совершенствованием компактных и надежных широкополосных источников направленного электромагнитного излучения терагерцового диапазона для различных областей их применения. В данной работе проведены испытания различных фотопроводящих антенн на основе кристаллов полупроводящего LT-GaAs, служащими в качестве источника электромагнитных волн в диапазоне 0,5-2,5 ТГц.

Излучение титан-сапфирового фемтосекундного лазера (100 мВт, 60 фс, 80 МГц) после прореживателя (5 мс, 20 Гц) фокусировалось с помощью сферической или цилиндрической линзы с фокусным расстоянием 5 см между золотыми электродами ФПА. Электроды располагались на поверхности кристалла LT-GaAs в виде полосок длиной 2 мм на расстоянии 200 мкм друг от друга. С помощью источника питания на электроды подавалось постоянное напряжение 10-200 В. Фокусирующая линза 3 могла перемещаться поперек электродов ФПА с помощью микрометрической подачи.

Исследовались места между электродами ФПА, где имеет место наибольшая генерация фототока и наибольшая генерация ТГц излучения. ТГц излучение собиралось первым вне осевым параболическим зеркалом в параллельный пучок и фокусировалось через терагерцовый фильтр вторым таким же зеркалом на пироэлектрический кристалл, сигнал с которого с помощью специального усилителя подавался на запоминающий осциллограф. На этот же осциллограф подавался и сигнал фототока ФПА. Получены результаты измерений фототока и средней мощности ТГц излучения из ФПА при сканировании пятна фокусировки излучения ФС лазера от катодного электрода к анодному электроду ФПА.

Обнаружено, что максимумы кривых не совпадают и максимум генерации ТГц излучения ближе к положительному электроду. На основе экспериментальных измерений получены зависимости максимальной средней мощности генерации ТГц излучения от диаметров пятен фокусировки сферической линзой. При одинаковой энергии излучения ФС лазера эффективная генерация наблюдалась при приближении плотности мощности этого излучения к величине  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup>.

С.А. МАРЦЫНЮКОВ, В.В. ЧЕРНИГОВСКИЙ,  
Д.К. КОСТРИН, А.А. ЛИСЕНКОВ<sup>1</sup>

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
<sup>1</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНЕРЦИОННОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАЗЕРОВ**

В работе рассмотрены возможности управления выходной мощностью газоразрядного лазера с использованием электромагнитной системы. Исследована инерционность такой системы.

S.A. MARTSINUKOV, V.V. CHERNIGOVSKIY,  
D.K. KOSTRIN, A.A. LISEKOV<sup>1</sup>

*Saint Petersburg State Electrotechnical University  
<sup>1</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of the RAS, Saint Petersburg*

## **RESEARCH OF INERTIA OF CONTROL SYSTEM OF THE RADIATION POWER OF GAS DISCHARGE LASERS**

In this article possibilities of control of the output power of gas discharge laser using an electromagnetic system is shown. The inertia of this system was researched.

Из выпускаемых в настоящее время технологических лазеров, наиболее распространенными являются газоразрядные лазеры на углекислом газе. При использовании лазеров в технологических процессах возникает необходимость управления мощностью лазерного излучения. Существующие способы управления мощностью CO<sub>2</sub>-лазера далеко не оптимальны, что в значительной мере ограничивает их применение. Активная среда CO<sub>2</sub>-лазеров представляет собой смесь газов, поэтому за счет внешнего воздействия на положительный столб тлеющего разряда, удастся изменять плотность заполнения разрядного промежутка и обеспечить модуляцию мощности излучения. При этом требуется как плавное изменение когерентной мощности, так и формирование импульса с заданной амплитудой и формой.

Поведение газового разряда в магнитном поле исследовалось в макете, позволяющем изменять как состав и давление наполняемого газа, так и условия существования разряда, достигаемые за счет наложения

магнитного поля. Исследования проводились в газовой среде чистого аргона (Ar) и смеси газов  $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-He}$ .

Для создания поперечного магнитного поля использовался электромагнит, конструкция которого была такова, что при расположении его относительно макета он своим сердечником охватывал газоразрядную трубку. Внутри сердечника формируется однородное магнитное поле, направленное перпендикулярно оси трубки. Воздействие поперечного магнитного поля на газовый разряд характеризуется проявляющейся инерционностью смещения частиц в плазме, оцениваемой по сдвигу осциллограмм интенсивности спонтанного свечения и по поступающему на зонд ионному току относительно импульса тока электромагнита. В процессе работы изменялись: форма, амплитуда, частота следования и длительность импульса (рис. 1).

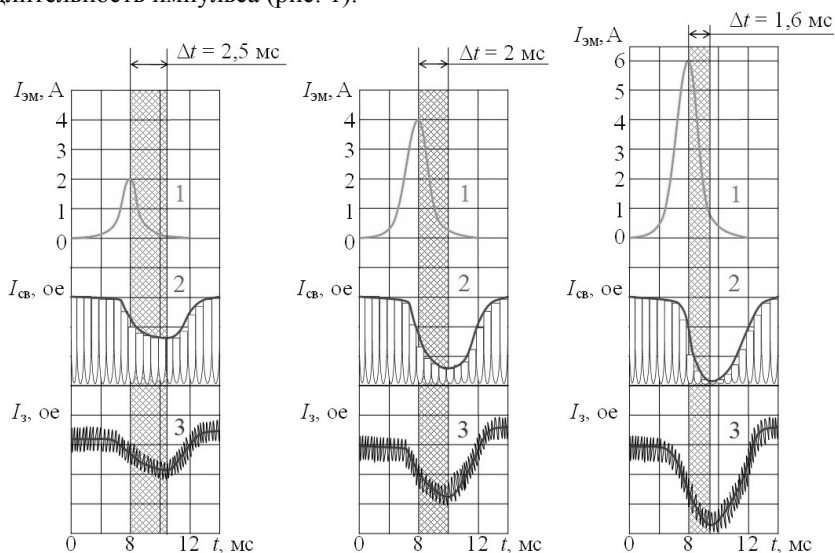


Рис. 1. Инерционность смещения газового разряда:  $I_{ЭМ}$  – форма импульса тока через катушку электромагнита;  $I_{СВ}$  – свечение разряда;  $I_3$  – форма ионного тока на зонд

Оценка инерционности смещения разряда производилась при различных токах электромагнита и в широком диапазоне рабочих давлений. Было получено, что время смещения разряда под действием поперечного магнитного поля имеет порядок миллисекунды и уменьшается как с ростом тока электромагнита, так и с уменьшением давления газовой среды.

В.Е. РОГАЛИН<sup>1,2</sup>, О.М. КУГАЕНКО<sup>3</sup>, Е.Е. АШКИНАЗИ<sup>4,5</sup>,  
М.С. АНДРЕЕВА<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика», Москва*

<sup>2</sup>*Тверской государственной университет*

<sup>3</sup>*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Москва*

<sup>4</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

<sup>5</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>6</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОКСИДИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРА**

Исследована, методами электронной и атомно-силовой микроскопии, рентгеноспектрального анализа и оптической профилометрии, микроструктура поверхности оксидированного дюралюминия после воздействия на площадь – 100 см<sup>2</sup> мощного импульса СО<sub>2</sub>-лазера (E ~ 500 Дж, τ=5 мкс, в головной части ~ 200 нс). Слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, имевший толщину ~ 7 мкм, в результате неравновесного нагрева вплоть до T испарения, модифицировался с образованием поликристаллического конгломерата из ряда стехиометрических и не стехиометрических фаз оксидов алюминия и его соединений с марганцем Mn и с магнием Mg.

V.E. ROGALIN<sup>1,2</sup>, O.M. KUGAENKO<sup>3</sup>, E.E. ASHKINAZI<sup>4,5</sup>,  
M.S. ANDREEVA<sup>6</sup>

<sup>1</sup>*National Center of Laser Systems and Complexes Astrophysika, Moscow*

<sup>2</sup>*Tver State University*

<sup>3</sup>*National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*

<sup>4</sup>*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

<sup>5</sup>*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

<sup>6</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **MODIFICATION THE SURFACE OF OXIDIZED ALUMINUM AFTER EXPOSURE IT BY IMPULSE OF CO<sub>2</sub>-LASER**

Explore methods of electron and atomic - force microscopy, X-ray analysis and optical profilometry, the microstructure of the surface oxidized duralumin after exposure to an area of ~ 100 cm<sup>2</sup> powerful CO<sub>2</sub> laser pulse (E ~ 500 J, τ = 5 μs, at the head of ~ 200 ns) . A layer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, having a thickness of ~ 7 μm as a result of nonequilibrium heating up to T evaporation modified to form a polycrystalline conglomerate of several stoichiometric and non-stoichiometric phases alumina and compounds of manganese Mn and magnesium Mg.

Известно, что при плотности мощности  $\geq 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> в атмосфере воздуха воздействие микросекундного импульса CO<sub>2</sub>-лазера на металл инициирует низкороговый оптический пробой воздуха. Плазма поглощает большую часть излучения и экранирует металл от дальнейшего воздействия излучения. Поэтому на металле обычно, в этом случае, не наблюдалось следов поражения. Но на оксидированном дюралюминии Д16 мы наблюдали модификацию поверхности (рис. 1-3).

Рентгеноструктурные исследования показали, что элементный состав покрытия, которое несколько утонилось после лазерного воздействия, не изменился и состоит преимущественно из Al и кислорода с примесью серы. Фазовый состав изменился существенно. В зоне облучения образовался поликристаллический конгломерат, состоящий из многочисленных неравновесных фаз оксидов Al (моноклинный, гексагональный, ромбоэдрический Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и его соединений с Mn (Al<sub>6</sub>Mn, Al<sub>19</sub>Mn<sub>4</sub>) и с Mg (Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub>, AlMg). Сделан вывод: излучение пика импульса поглощается в Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с  $\beta = \sim 10^4$  см<sup>-1</sup> и нагревает слой толщиной ~ 1 мкм до температуры кипения.

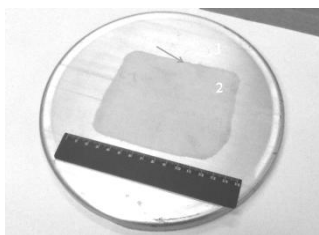


Рис. 1. Общий вид зоны облучения:  
1 - пластина Д16 (d = 200 мм, h = 1 мм);  
2 - «след» лазерного импульса;  
3 - непрозрачная граница зоны облучения

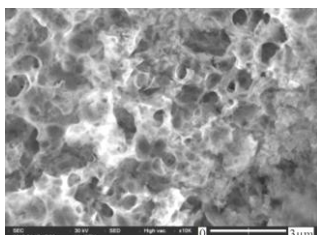
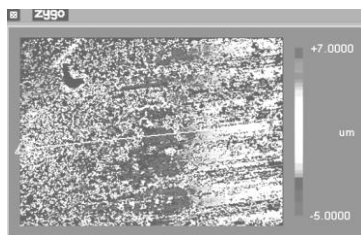
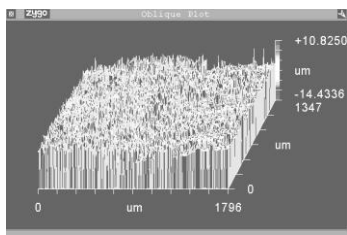


Рис. 2. Вспененная оксидная пленка (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на Д16 после воздействия (РЭМ SNE4500M, фирма ОПТЭК)



а)



б)

Рис. 3. Двух- (а) и трехмерные (б) изображения характерного участка зоны облучения, интерферометр «Zygo», размер кадра 1796 x 1347 мкм

Г.В. ОДИНЦОВА, Е.А. ВЛАСОВА, С.М. КОПЫТОВ, Р.М. ЯЦУК,  
Ю.Ю. КАРЛАГИНА, Я.М. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ОКИСЛЕНИЯ НА АДГЕЗИЮ ТИТАНОВЫХ ПЛЕНОК К ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

В работе показан способ нанесения цветных изображений на поверхность серебряного изделия, за счет лазерного окисления титановой пленки, напыленной на поверхность серебра. Измерены спектры отражения полученных покрытий и рассчитаны их цветовые координаты. Проведены тесты на адгезию титановой пленки к серебряной подложке.

G.V. ODINTSOVA, E.A. VLASOVA, S.M. KOPYTOV,  
R.M. YATSUK, Yu.Yu. KARLAGINA, Ya.M. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **THE INFLUENCE OF LASER OXIDATION ON TITANIUM FILM ADHESION TO SILVER SURFACE**

A method of silver coloration due to laser oxidation of evaporated titanium film is shown. Reflectance spectra of obtained structures are measured and color coordinates are calculated. Titanium film adhesion to silver is measured.

В предыдущих работах [1] авторами была представлена технология формирования цветных структур на поверхностях некоторых металлов и сплавов при облучении иттербиевым импульсным волоконным лазером наносекундной длительности импульсов. Было показано, что при лазерном локальном нагреве поверхностей нержавеющей стали 10X18H10T и технического титана BT1-0 образуются двухслойные оксидные структуры, при этом интегральный цвет поверхности металлов определяется как интерференционными эффектами в тонком верхнем оксидном слое, так и цветом массивного нижнего окисла [2].

Данным способом невозможно получить цветное изображение на поверхности драгоценных металлов, поэтому авторами работы был предложен способ получения цветных изображений на поверхности драгоценных металлов, за счет лазерного окисления титановой пленки, предварительно нанесенной на поверхность серебра с помощью магнетронного напыления.

С помощью микроскоп-спектрофотометра МСФУ-К измерены спектры отражения полученных покрытий и рассчитаны их цветовые координаты в системе Lab для источника освещения типа D65. Проведены тесты на адгезию титановой пленки к серебряной подложке: трение неметаллическими (войлочным диском, тканью) и металлическими предметами, воздействие лимонной кислотой и серой, нагрев до температуры 600°C. Тесты показали положительный результат и возможность использования данного способа в ювелирной промышленности.

*Список литературы*

1. Veiko V., Odintsova G., Ageev E., Karlagina Yu., Loginov A., Skuratova A., Gorbunova E. Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // Optics Express. 2014. V.22. Is.20. P.24342-24347.
2. Veiko V.P., Slobodov A.A., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Physics. 2013. V.23. P.066001.



**В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>**

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

*<sup>1</sup>Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ РАДИАЛЬНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Предложена эффективная оптическая схема обработки материалов радиально поляризованным лазерным излучением.

**V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>**

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

*<sup>1</sup>Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the NRNU MEPHI,  
Ulyanovsk region*

## **MATERIALS TREATMENT BY RADially POLARIZED RADIATION**

The efficient optical scheme for material treatment by radially polarized laser radiation was suggested.

Для увеличения эффективности лазерной обработки металлов предложены различные методы, в том числе с использованием дополнительного к Френелевскому поглощению энергии поверхностных поляритонных (ПП) мод (см., например, [1, 2]). В последнем случае использовалось линейно поляризованное излучение. Теоретическое рассмотрение излучения с осесимметричной поляризацией показало [2] эффективность использования радиально-поляризованного излучения (РПИ), поскольку дополнительная энергия поляритонных мод переносится ими к центру области воздействия. Кроме того, радиально-поляризованное излучение фокусируется в пятно меньших размеров, чем, например, линейно-поляризованное. В связи с этим возникает задача построения схемы вынужденного формирования резонансной кольцевой решетки радиально-поляризованным излучением, аналогично схеме работы [1]. Угол падения ( $\theta$ ) РПИ на обрабатываемую поверхность (см. рис. 1) должен быть таким же, как и в схеме с симметричным падением пучков излучений [1]:  $\theta = \arcsin(\eta/3) \approx 19^\circ$  (граница раздела металл-вакуум).

При этом для формирования кольцевой решетки необходима аксиальная симметрия углов падения пучков излучений на обрабатываемую поверхность. Использование схемы с аксиконом 1 и РПИ (см. рис. 1), реализует ситуацию аксиально-симметричного падения излучения на образец 2 и при выборе определенного угла аксикона ( $\beta$ ) – формирование резонансной кольцевой решетки (см. вставку на рис. 1). При этом энергия возбуждаемых на решетке ПП будет переноситься к центру области воздействия (указано стрелками на вставке). Известные предварительные результаты по сверлению отверстий в металлах импульсами радиально-поляризованного лазерного излучения продемонстрировали  $\sim 2$  кратное увеличение скорости сверления [3], как и резка металлов непрерывным  $\text{CO}_2$  РПИ [4] ( $\sim 1,5$ ), при самосогласованном развитии резонансных решеток из исходного спектра шероховатой поверхности (либо неустойчивостей плоского фронта расплавленной поверхности), а не вынужденных.

Отметим, что рассмотренный эффект должен наблюдаться как для поверхностных плазмон-поляритонов, так и для поверхностных фонон-поляритонов.

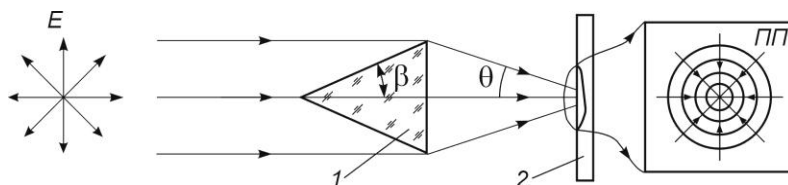


Рис. 1. Оптическая схема обработки материалов радиально-поляризованным излучением: 1 - аксикон, 2 - обрабатываемый образец, слева показано формирование кольцевой динамической резонансной решетки, являющейся фокусирующей линзой для возбуждаемых на ней поверхностных поляритонов

#### Список литературы

1. Макин В.С., Баженов В.В., Либенсон М.Н. Патент РФ №1181413. 1999.
2. Макин В.С., Макин Р.С. Взаимодействие осесимметрично поляризованного лазерного излучения с конденсированными средами // Оптика и спектроскопия. 2013. Т.115. С.670.
3. Meier M., Romano V., Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized radiation // Appl. Phys. A. 2007. V.86. No.3. P.329.
4. Низьев В.Г., Нестеров А.В. Особенности резки металлов осесимметрично поляризованным излучением // Известия РАН. Сер. Физич. 1999. Т.63. №10. С.2041-2048.

Д.В. ГАНИН<sup>1,2</sup>, К.Э. ЛАПШИН<sup>2</sup>, А.З. ОБИДИН<sup>2</sup>,  
С.К. ВАРТАПЕТОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **МЕТОД ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕЗКИ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ КОРОНАРНЫХ СТЕНТОВ И ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРАМИ**

Представлены результаты экспериментов по прецизионной резке прозрачных материалов с помощью метода использующего филаментацию излучения фемтосекундного лазера. Показано успешное применение разработанного метода для резки медицинских полимерных коронарных стентов.

D.V. GANIN<sup>1,2</sup>, K.E. LAPSHIN<sup>2</sup>, A.Z. OBIDIN<sup>2</sup>, S.K. VARTAPETOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **METHOD OF HIGH PRECISION CUTTING OF BIODEGRADABLE CORONARY STENTS AND TRANSPARENT MATERIALS BY FEMTOSECOND LASER**

Presents the results of experiments on precision cutting of transparent materials using a method which uses the filamentation of femtosecond laser radiation. Shown successful application of the developed method for cutting medical polymer coronary stents.

Ежегодно в России от сердечно-сосудистых заболеваний умирает почти 1,3 миллиона человек. Своевременное рентгеноэндоваскулярное вмешательство в виде коронарного стентирования и коронарной ангиопластики способно предотвратить инфаркт миокарда.

Использование фемтосекундных лазеров привело к созданию их нового поколения – биоразлагаемых стентов. Однако существующая технология резки полимерных коронарных стентов может быть значительно улучшена. Наши исследования показали [1, 2], что использование филаментации лазерного излучения (Керровская самофокусировка, различные типы сферических aberrаций) в объеме прозрачных диэлектриков позволит увеличить эффективность резки и

улучшить качественные характеристики реза. В случае филаментации в объеме образца создается нить излучения длиной несколько сотен микрометров и диаметром порядка двух микрометров. Длинной лазерной нити можно управлять [3] изменяя параметры лазерного излучения. Сканируя образец данной нитью, за один фемтосекундный импульс излучения можно прорезать образец толщиной более 100 мкм, а при типичной частоте следования импульсов в несколько сотен килогерц - добиться впечатляющей производительности. Энергоэффективность в несколько раз выше по сравнению с технологиями, использующими послонную лазерную абляцию.

Были проведены эксперименты по резке трубок-заготовок полимерных биоразлагаемых стентов из PLLA (рис. 1) и прозрачных диэлектриков (плавленый кварц, акрил, оптическое стекло К-8). В результате были получены резы со следующими характеристиками: ширина реза менее 5 мкм, конусность реза отсутствует, шероховатость поверхности  $Ra < 1$  мкм, отсутствует зона теплового воздействия. Изменение фокусирующей системы может дополнительно увеличить производительность без потери качества [4]. Полученные результаты показали наличие преимуществ разрабатываемой технологии по сравнению с используемыми в настоящее время технологиями резки прозрачных материалов по таким параметрам как: ширина реза, конусность, шероховатость поверхности реза и энергоэффективность.

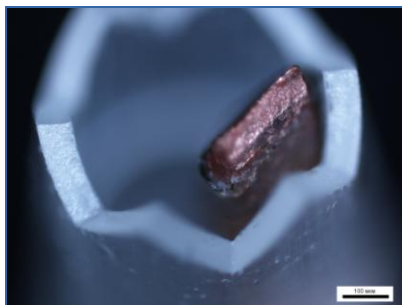


Рис. 1. Трубка из PLLA, разрезанная с помощью филаментации ФС импульсов

#### Список литературы

1. Vartapetov S.K., Ganin D.V., et. al. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (8). P.725.
2. Ganin D.V., Obidin A.Z., et. al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.67-73.
3. Вартапетов С.К., Ганин Д.В. и др., // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике. Сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.276-277.
4. Ganin D.V., et al. // IV International conference on the Physics of optical material and devices. Book of Abstracts. B.: Institut za nuklearne nauke "Vinca", 2015. P.48.

Е.Д. ВОВЧЕНКО, А.П. МЕЛЕХОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛАЗЕРНО-ИНИЦИИРУЕМОЙ ВАКУУМНОЙ ИСКРЫ**

Проведено изучение динамических и спектральных параметров мягкого рентгеновского излучения плазменного образования, получаемого в результате лазерно-инициируемого вакуумного разряда при фокусировке лазера вблизи острия конусообразного анода (катода) разрядной системы.

E.D. VOVCHENKO, A.P. MELEKHOV

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

## **THE INFLUENCE OF PARAMETERS OF LASER RADIATION ON EMISSION PROPERTIES OF LASER TRIGGERED VACUUM SPARK**

The study of dynamic and spectral parameters of soft X-ray plasma formation obtained as a result of laser triggered vacuum discharge when focus laser is on the edge of the conical anode (cathode) electrode discharge system.

В работе приводятся результаты сравнительных экспериментов по определению влияния параметров лазерной системы на инициализацию вакуумной искры и эмиссию мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Эксперименты показали, что принципиальную роль для динамики развития вакуумного разряда играет расстояние  $d$  от точки фокусировки лазерного луча до вершины конусообразного электрода, полярность которого меняется в начале каждой последующей серии эксперимента. Далее, в зависимости от фокусировки лазера на катод или анод, мы будем говорить, соответственно, о *катодном* или *анодном* разрядах. Схема экспериментальной установки приведена в [1].

Величина энергии лазерного импульса  $E_{\text{лазер}} = 40 \div 60$  мДж при длительности  $\tau \approx 17$  нс. Для регистрации МРИ использовались рентгеновские pin-диоды с парой краевых фильтров: Al – 9 мкм и Mg – 17 мкм. На рис. 1 приведены результаты обработки сигналов с pin-диодов для условия  $d \approx 0.1$  мм, где каждая точка – величина интеграла по длительности импульса МРИ. Всего примерно 60 импульсов в каждом

эксперименте. На рис. 2 приведены результаты обработки сигналов с рн-диодов для условия  $d \approx 1.0$  мм.

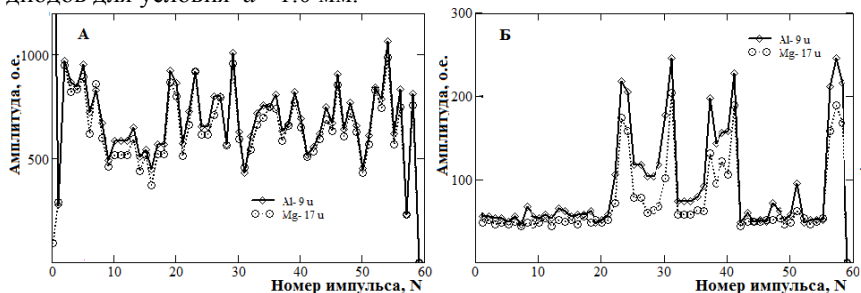


Рис. 1. Эмиссия МРИ плазмой вакуумной искры при  $d \approx 0.1$  мм: катодный разряд (А); анодный разряд (Б), величина энергии  $E_c = 18.1$  Дж при напряжении  $U_c = 12.8$  кВ.

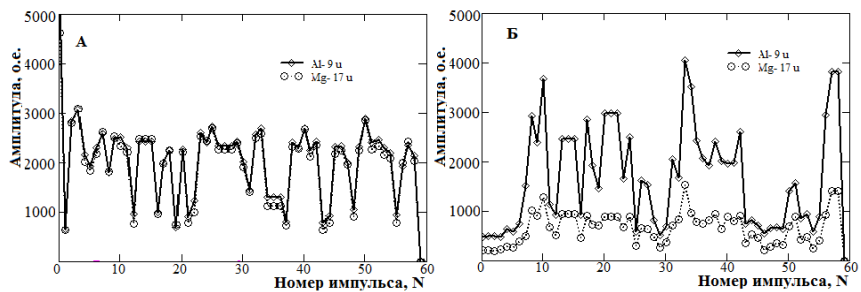


Рис. 2. Эмиссия МРИ плазмой вакуумной искры при  $d \approx 1$  мм: катодный разряд (А); анодный разряд (Б), величина энергии  $E_c = 18.2$  Дж при  $U_c = 12.9$  кВ.

Эксперименты показали, что при *катодном* разряде для любых  $d$  временные и спектральные параметры эмиссии МРИ примерно сохраняются, различаются только амплитуда сигналов, скорее всего из-за нестабильности лазерного излучения (см. рис.1А и рис. 2А). При *анодном* разряде с увеличением  $d$  задержка времени инициации разряда возрастает примерно на порядок. Спектральные характеристики МРИ разряда также меняются. Из рис. 1Б видно, что при  $d \approx 0.1$  мм плазма *анодного* разряда излучает МРИ существенно слабее плазмы *катодного* разряда. При  $d \approx 1$  мм эмиссия МРИ сопоставима (рис. 2А и 2Б). Механизм формирования *анодного* разряда на данный момент не вполне понятен и сейчас необходимо, прежде всего, разработать модель, объясняющую полученные экспериментальные результаты.

#### Список литературы

1. Alkhimova M.A., et. al. // Nukleonika. 2015. V.60(2). P.221-227.

Х. БАЗЗАЛ, А.Р. ФАДАИЯН, Е.С. ВОРОПАЙ, А.П. ЗАЖОГИН  
*Белорусский государственный университет, Минск*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ  
РАДИКАЛОВ АЮ В ПЛАЗМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ  
НА АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ Д16Т В АТМОСФЕРЕ  
ВОЗДУХА**

Изучено влияние расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового состава приповерхностной лазерной плазмы методом лазерной искровой спектроскопии (спектрометр LSS-1). Показана возможность увеличения доли радикалов АЮ в плазме при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на мишень. Определены условия влияния параметров лазера и процессов на поверхности и в плазме на формирование определенного ионного и молекулярного состава плазмы.

Kh. BAZZAL, A.P. FADAIJAN, E.S. VOROPAY, A.P. ZAJOGIN  
*Belarusian State University, Minsk*

**INVESTIGATION OF THE AIO RADICAL DEFORMATION  
PROCESSES IN THE PLASMA WHEN THE ALUMINUM  
ALLOY D16T IS SUBJECTED TO THE EFFECT OF DOUBLE  
LASER PULSES IN THE AIR**

The influence of double laser pulses defocusing on the desired formation of the component and charge composition of the surface laser plasma has been studied by laser spark spectrometry using an LSS-1 laser. The possibility to increase the share of AIO radicals in the plasma due to the effect of a series of double laser pulses on the target has been demonstrated. The conditions associated with the effect exerted by the laser parameters and also by the surface and bulk processes on the formation of the specific ionic and molecular composition of the plasma have been determined.

Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного воздействия.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями сдвоенных

лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанокластеров АЮ для использования в технологиях получения нанокристаллов и напыления тонких пленок.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм.

Динамика образования радикала АЮ изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы (484,21 нм) при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха. С использованием интервала 8 мкс нами проведено исследование процесса образования радикалов АЮ от энергии импульсов в зависимости от расфокусировки их. Данные проведенных исследований приведены на рис. 1.

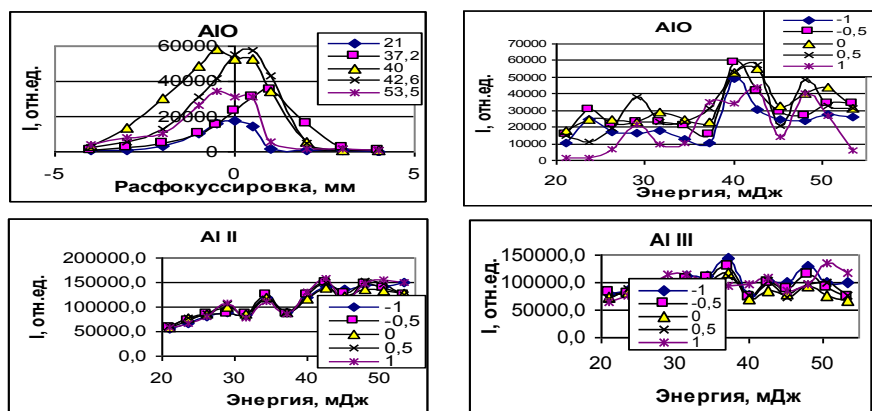


Рис. 1. Зависимость интенсивности полос АЮ (484,21 нм), ионных линий Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм) в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов (в рамке величина расфокусировки в мм)

При сопоставлении рисунков обращает внимание хорошая корреляция между возрастанием интенсивности полос радикалов и существенным уменьшением интенсивности линии Al III (452,92 нм). Наибольшее влияние в данном случае оказывает плотность энергии в месте воздействия излучения на поверхность, а также форма кратера (при расфокусировке вглубь пластины).



Д.С. ШТАРЕВ, А.В. ШТАРЕВА<sup>1</sup>, И.С. ДОРНИН,  
А.И. БЛОХ, А.В. СЮЙ

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск  
<sup>1</sup>Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск*

## **ОПТИЧЕСКИЕ И КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВИСМУТАТОВ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Теоретически исследовано влияние способа получения фотокатализатора в виде гетерогенной композиции висмутат кальция – оксид висмута на его оптические и каталитические свойства. Проанализированы два способа получения фотокатализатора в форме «core-shell». В одном случае в качестве ядра (core) выступает оксид висмута, а в качестве оболочки (shell) – висмутат кальция. Во втором случае материалы ядра и оболочки поменяны местами. Рассчитаны интегральные значения поглощенной плотности мощности излучения фотокатализатором двух типов. Показано, что количественные и спектральные характеристики поглощенного излучения зависят от чередования слоев ядра и оболочки в частицах фотокатализатора.

D.S. SHTAREV, A.V. SHTAREVA<sup>1</sup>, I.S. DORONIN,  
A.I. BLOKH, A.V. SYUY

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk  
<sup>1</sup>Institute of Tectonics and Geophysics named after Yu.A. Kosygin of the FEB RAS,  
Khabarovsk*

## **OPTICAL AND CATALYTIC PROPERTIES OF ALKALINE EARTH METAL BISMUTHATES**

The work is devoted to the theoretical study of the effect of a method for producing a photocatalyst in the form of heterogeneous composition bismuthate calcium - bismuth oxide on its optical and catalytic properties. There are two ways to obtain a photocatalyst in the form of «core-shell» were analyzed. In one case, as a core serves bismuth oxide, as well as a shell - bismuthate calcium. In the second case, the core and shell materials are swapped. Integral value of the absorbed power density photocatalyst two types are calculated. It was shown that quantitative and spectral characteristics of radiation absorbed depends on the alternation of layers in the core and shell particles of the photocatalyst.

Среди всех фотокаталитических материалов наибольшей популярностью обладает диоксид титана  $\text{TiO}_2$ , который является фотокатализатором окислительного разложения органических веществ в

силу своих уникальных характеристик, химической стабильности и высокой активности [0]. Однако диоксид титана обладает широкой запрещенной зоной (3,2 эВ для анатаза, 3,0 эВ – для рутила), поэтому может быть фотовозбужден только излучением УФ-диапазона, которого в спектре солнечного света насчитывается только 4%. Для того, чтобы повысить эффективность использования солнечной энергии в спектральном диапазоне видимого излучения ( $\lambda > 420$  нм) при каталитическом разложении органических веществ, разрабатываются каталитические композиции, чувствительные к излучению видимого диапазона.

В последнее время возрос интерес [2] к фотокаталитическим системам на основе висмутатов щелочно-земельных металлов (в частности – к фотокаталитической композиции висмутат кальция – оксид висмута,  $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ ).

Представлены результаты расчета спектров поглощения фотокатализаторов двух типов, когда оболочка -  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , ядро -  $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}$  и наоборот. Рассчитаны интегральные значения поглощенной плотности мощности солнечного излучения в области спектра 300-750 нм.

Проведенные вычисления показывают, что характер поглощения оптического излучения, а, следовательно, и каталитическая активность различаются в зависимости от порядка чередования слоев в частице фотокатализатора. Для экспериментально более изученных частиц с ядром из оксида висмута и оболочкой из висмутата кальция ( $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ ) характерно практически полное поглощение активирующего излучения оболочкой (на долю ядра в данном случае приходится лишь порядка 10% поглощенного излучения).

В свою очередь, для частиц с обратным порядком чередования слоев – оболочка из оксида висмута, ядро из висмутата кальция ( $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{CaBi}_6\text{O}_{10}$ ) – в целом характерно поглощение меньшего количества фотонов активирующего излучения. Однако в этом случае наблюдается гораздо более равномерное распределение между поглощением активирующего излучения ядром (около 18%) и оболочкой (порядка 13%).

#### *Список литературы*

1. Fujishima A., Rao T.N., Tryk D.A. Titanium dioxide photocatalysis // J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev. 2000. V.1. P.1-21.
2. Wang Y., He Y., Li T., Cai J., Luo M., Zhao L. Photocatalytic degradation of methylene blue on  $\text{CaBi}_6\text{O}_{10}/\text{Bi}_2\text{O}_3$  composites under visible light // Chemical Engineering Journal. V.189-190. 2012. P.473-481.

А.И. ЧЕРНОВ<sup>1,2</sup>, П.В. ФЕДОТОВ<sup>2</sup>, Е.Д. ОБРАЗЦОВА<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ОДНОСТЕННЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК И ПОЛОС ГРАФЕНА ДЛЯ ФОТОНИКИ**

Одностенные углеродные нанотрубки были использованы для создания нового одномерного материала внутри – полос графена. Диаметр нанотрубок определяет строение внутренних структур. Помимо полос графена внутри могут формироваться упорядоченные стопки молекул. Были изучены оптические свойства полученных гибридных материалов. При помощи фотолюминесцентной спектроскопии было обнаружено, что возможно излучение света в двух различных спектральных диапазонах: от 500 до 640 нм, обусловленное полосами графена, и от 1300 до 2000 нм, относящиеся к одностенным углеродным нанотрубкам. Полученные материалы могут быть применены в качестве прочных nanoизлучателей.

A.I. CHERNOV<sup>1,2</sup>, P.V. FEDOTOV<sup>2</sup>, E.D. OBRAZTSOVA<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **HYBRID MATERIALS BASED ON SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES AND GRAPHENE NANORIBBONS FOR PHOTONICS**

Single-walled carbon nanotubes can be used as nanoreactors for growth of graphene nanoribbons. Diameter of the nanotube governs the inner structure type. Depending on the synthesis parameters encapsulated molecules can be arranged into stacks or polymerized into graphene nanoribbons. We have studied optical properties of hybrid materials. Nanohybrids emit light in two spectral regions: 500 to 640 nm is the contribution from nanoribbons and 1300 to 2000 nm – emission from nanotubes. Synthesized materials can be used as robust nanoemitters, inner structures are protected by the single-walled carbon nanotubes.

Полосы графена (ПГ) – это новый углеродный наноразмерный материал с  $sp^2$  гибридизацией, обладающий уникальными физическими и химическими свойствами. Электронные свойства ПГ зависят от их ширины, геометрии и формы краев. По аналогии с одностенными углеродными нанотрубками (ОУН) [1], ПГ могут обладать как

металлическим, так и полупроводниковым типом проводимости. В случае наличия запрещенной зоны, её величина обратно зависит от геометрических размеров ПГ [2]. Создание полос с заданным размером (ширина и длина) и точность в их формировании являются очень тяжелой задачей. В нашей работе ОУН использовались в качестве реакторов для создания ПГ [2,3]. Молекулы коронена помещались внутрь трубки и полимеризацией преобразовывались в ПГ. Оптические свойства наногридов были исследованы спектроскопией комбинационного рассеяния света, фотолюминесцентной спектроскопией, спектроскопией поглощения[3-5]. Обнаружен сигнал фотолюминесценции ПГ [1,2].

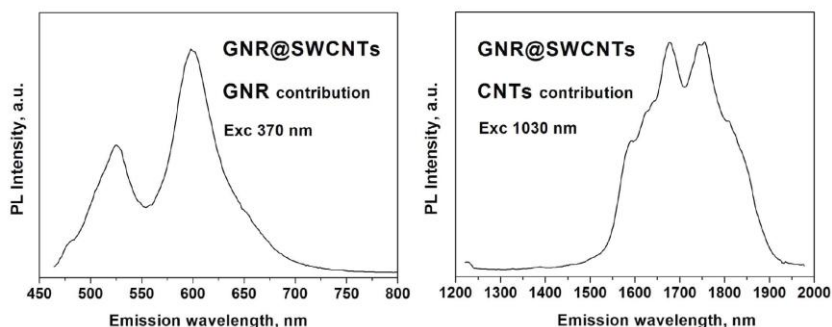


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции полос графена внутри одностенных углеродных нанотрубок, левый спектр получен при возбуждении образца на длине волны 370 нм и обусловлен излучением внутренних структур – полос графена, правый спектр получен при возбуждении образца на длине волны 1030 нм и является сигналом от внешних одностенных углеродных нанотрубок

Работа поддержана грантами РФФИ 14-02-00777, 15-32-50530, 15-32-20941 и СП-7362.2013.3, МК-5480.2016.2.

#### Список литературы

1. Chernov A.I., Obratsova E.D. // PSS (b). 2010. V.247. No.11-12. P.2805.
2. Chernov A.I., Fedotov P.V., Talyzin A.V., Suarez-Lopez I., Anoshkin I.V., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Obratsova E.D. // ACSNano, 2013. V.7. P.6346.
3. Fedotov P.V., Chernov A.I., Talyzin A.V., Anoshkin I.V., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Obratsova E.D. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2013. V.8. P.16.
4. Chernov A.I., Fedotov P.V., Anoshkin I.V., Nasibulin A.G., Kauppinen E.I., Kuznetsov V.L., Obratsova E.D. // PSS (b). 2014. V.251. No.12. P.2372.
5. Chernov A.I., Fedotov P.V., Krylov A.S., Vtyurin A.N., Obratsova E.D. // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2016. V.10(1). P.012504.

Г.Е. АДАМОВ, К.С. ЛЕВЧЕНКО, В.Р. КУРБАНГАЛЕЕВ,  
Н.О. ПОРОШИН, Е.П. ГРЕБЕННИКОВ  
*ОАО «ЦНИТИ «Техномах», Москва*

**ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ  
НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО  
ФУЛЛЕРЕНА C60, СВЯЗАННЫХ ФОТОУПРАВЛЯЕМЫМ  
СПЕЙСЕРОМ**

Проведен синтез и исследования двумерных наноструктур на основе модифицированного N,N'-бис-(3-диэтиламино-пропил)амидом малоновой кислоты фуллерена C60, в которых молекулы фуллерена связаны между собой с помощью фотохромного бифункционального спейсера 1,2-бис-(5-карбокси-2-метил-тиофен-2-ил)-циклопентена) при различном соотношении компонентов.

G.E. ADAMOV, K.S. LEVCHENKO, V.R. KURBANGALEEV,  
N.O. POROSHIN, E.P. GREBENNIKOV  
*OJSC CSRIT "Technomash", Moscow*

**CREATION AND INVESTIGATION  
OF 2D NANOSTRUCTURES BASED ON MODIFIED  
FULLERENES C60 LINKED BY PHOTO-MANAGED SPACERS**

Synthesis and investigations of 2D nanostructures based on fullerene C60 modified by N,N'-Bis-(3-diethylamino-propyl)malonamide. Fullerene molecules is linked each other by photochromic bifunctional spacers 1,2-bis-(5-carboxy-2-methyl-thiophen-2-yl)-cyclopentene with different ration of the components.

Одной из интересных фундаментальных задач является изучение влияния наноразмерных объектов на свойства оптически активных молекул, находящихся рядом с их поверхностью. Это влияние оказывается на время жизни возбужденных состояний атомов и молекул, расположенных на расстояниях, меньших длины волны излучения [1]. Наличие сильных локальных полей влияет на скорость электронных переходов, т.е. время жизни возбужденных состояний, процессов поглощения и излучения света, процессов переноса энергии (например, световой или электрической), может изменять характеристики этих процессов, а так же приводит к значительному усилению или подавлению различных нелинейных оптических эффектов [2]. В случае, если

оптически активные молекулы связываются с поверхностью нанообъекта с помощью химических связей, то можно говорить о формировании гибридной наноструктуры [3].

Значительную перспективу для применения в гибридных наноструктурах являются фуллерены, обладающие очень интересными свойствами благодаря своей уникальной электронной структуре. Целью данной работы является изучение влияния связывания молекул фуллерена C60 с помощью фотоуправляемого спейсера с образованием двумерных наноструктур на их спектральные свойства.

В рамках работы проведена модификация фуллерена C60 остатками N,N'-бис-(3-диэтиламино-пропил)амидом малоновой кислоты с целью функционализации C60 производными амина, тогда как связывание осуществлялось с помощью синтезированного фотохромного соединения 1,2-бис-(5-карбокси-2-метил-тиофен-2-ил)-циклопентена (LS-529), имеющего в своей структуре две карбоксильные группы (рис. 1).

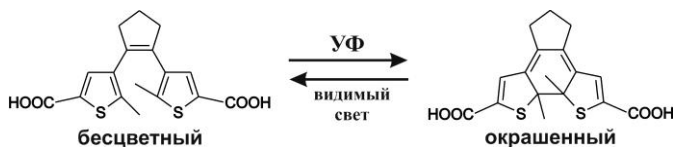


Рис. 1. Схема фотохромного перехода в молекуле LS-529

Для системы с молекулярным соотношением компонентов LS-529 : C60 = 1 : 1 наблюдается уменьшение поглощательной способности LS-529 в составе двумерной наноструктуры. Максимальное различие наблюдается в коротковолновой части спектра – на длине волны 250 нм уменьшение составляет около 10% для обоих исследованных состояний (до и после облучения УФ-излучением), на 340 и 510 нм – до 14% для наноструктур, содержащих молекулы LS-529 в фотоиндуцированном состоянии после облучения УФ.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №14-03-00479 А.

#### Список литературы

1. Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит. 2009. 480 с.
2. Климов В.В., Дюкля М., Летохов В.С. Спонтанное излучение атома в присутствии нанотел // Квантовая электроника. 2001. Т.31. №7. С.569-586.
3. Adamov G.E., Levchenko K.S., Kurbangaleev V.R., Shmelin P.S., Grebennikov E.P. Functional hybrid nanostructures for nanophotonics: synthesis, properties, and application // Russian Journal of General Chemistry. 2013. V.83. №11. P.2195-2202.

А.Ю. МАЙОР, Д.Ю. ПРОЩЕНКО<sup>1</sup>,  
Ю.А. ЩИПУНОВ<sup>2</sup>, И.В. ПОСТНОВА<sup>2</sup>

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

<sup>1</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

<sup>2</sup>*Институт химии ДВО РАН, Владивосток*

## **ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛОИДОВ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК**

Исследованы оптические и нелинейно-оптические характеристики углеродных квантовых точек, полученных методом гидротермального синтеза на второй гармонике фемтосекундного титан-сапфирового лазера.

A.Yu. MAYOR, D.Yu. PROSCHENKO<sup>1</sup>,  
Yu.A. SHCHIPUNOV<sup>2</sup>, I.V. POSTNOVA<sup>2</sup>

*Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok*

<sup>1</sup>*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

<sup>2</sup>*Institute of Chemistry of FEB RAS, Vladivostok*

## **OPTICAL PROPERTIES OF CARBON COLLOIDS QUANTUM DOTS**

The optical and nonlinear optical properties of carbon quantum dots, obtained by hydrothermal synthesis at the second harmonic of a femtosecond Ti: sapphire laser are investigated.

Углеродные квантовые точки (УКТ) являются новым классом углеродных наночастиц, получены впервые в ходе очистки однослойных углеродных нанотрубок с помощью подготовительного электрофореза в 2004 г.[1]. УКТ представляют собой дискретные наночастицы углерода сферической формы и имеющие размеры не более 10 нм. Благодаря своим уникальными свойствами и большим потенциалом для различных приложений УКТ находят всё больше применений в биомедицине, оптронике, катализе, биосенсорах и т.д. Тем не менее, несмотря на их уникальные оптические свойства, нелинейные оптические характеристики УКТ недостаточно изучены и исследования проводились только для нано и пикосекундного излучения [2].

Ниже приведены результаты исследования оптических характеристик УКТ, полученных из разных образцов хитина методом гидротермального синтеза при одинаковых условиях. На рис. 1 приведены спектры

пропускания и флуоресценции возбуждаемой второй гармоникой фемтосекундного титан-сапфирового лазера (400 нм, 80 фс) УКТ. В таблице 1 приведены нелинейно-оптические характеристики УКТ и на длине волны 400 нм полученные методом Z-scan.

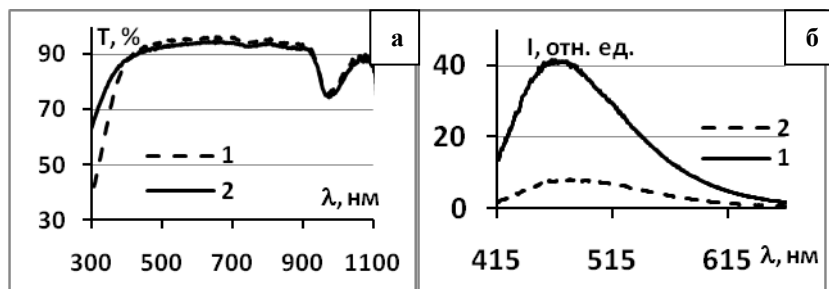


Рис. 1. Спектры пропускания (а) и флуоресценции (б) УКТ1 - 1, УКТ2 - 2

Таблица 1. Нелинейно-оптические характеристики

Длина волны	УКТ1		УКТ2	
	$n_2$ [см <sup>2</sup> /Вт]	$\beta$ [см/Вт]	$n_2$ [см <sup>2</sup> /Вт]	$\beta$ [см/Вт]
400 нм	$5.2 \times 10^{-16}$	$8.8 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-16}$	$6.6 \times 10^{-12}$

Согласно полученным результатам у образца УКТ1 с более высоким выходом флуоресценции наблюдаются и более высокие нелинейно-оптические характеристики на длине волны 400 нм при длительности импульсов 80 фс.

Измерения оптических характеристик выполнены в ДВФУ при поддержке гранта РФФ, проект № 14-50-00034. Нелинейно-оптические характеристики получены в ЦКП ЛАМИ ИАПУ ДВО РАН при поддержке гранта ДВО РАН № 0262-2015-0060.

#### Список литературы

1. Xu X., Ray R., Gu Y., Ploehn H.J., Gearheart L., Raker K., Scrivens W.A. Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments // J. Am. Chem. Soc. 2004. V.126(40). P.12736- 12737.
2. Bourlinos A.B., Stassinopoulos A., Angelos D., Zboril R., Georgakilas G., Giannelis E.P. Photoluminescent carbogenic dots // Chem. Mater. 2008 V.20(14). P.4539-4541.



К.Н. БОЛДЫРЕВ, А.Д. МОЛЧАНОВА, Н.Н. КУЗЬМИН<sup>1</sup>

*Институт спектроскопии РАН, Троицк*

<sup>1</sup>*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **НОВЫЕ МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В $\text{CuB}_2\text{O}_4$**

Настоящая работа посвящена исследованию каскада магнитных фазовых переходов в метаборате меди методом линейного антиферромагнитного дихроизма – нового магнитооптического метода, ранее обнаруженного в данном соединении авторами работы. Эти исследования позволили пролить свет на природу столь богатой магнитной фазовой диаграммы, а также ответить на вопрос о возможности управления кристаллической киральностью при помощи внешнего магнитного поля, ранее высказанного авторами другой работы, ожесточенные споры о которой велись на протяжении нескольких лет на страницах научных журналов.

K.N. BOLDYREV, A.D. MOLCHANOVA, N.N. KUZMIN<sup>1</sup>

*Institute for Spectroscopy of the RAS, Troitsk*

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University*

## **NEW MAGNETOOPTIC EFFECTS IN $\text{CuB}_2\text{O}_4$**

The present work is devoted to the study of the cascade of magnetic phase transitions in copper metaborate by a new magneto-optical method, namely linear antiferromagnetic dichroism. These studies casts light on the nature of such a rich magnetic phase diagram and answer the question about the possible control of crystal chirality using an external magnetic field, which earlier expressed by the authors of other work and caused hot debates in scientific community.

В последнее время большое внимание уделяется изучению магнетиков со сложной кристаллической и магнитной структурой. Одним из ярких представителей таких соединений является метаборат меди  $\text{CuB}_2\text{O}_4$ . Его примитивная кристаллическая ячейка содержит две различные позиции (4b и 8d с симметрией  $S_4$  и  $C_2$ ) для магнитного иона  $\text{Cu}^{2+}$  ( $S = 1/2$ ). В обеих позициях медь квадратно координирована, как и в высокотемпературных сверхпроводниках. При этом, магнитная подсистема меди (4b) упорядочивается при  $T_N = 21$  К, а затем, как нами было установлено, претерпевает изменения магнитной решетки при температурах 8.5 К и 7.9 К [1]. Подсистема меди в позиции 8d, напротив, не претерпевает магнитного упорядочения, так как является квазиодномерной, и лишь подмагничивается упорядоченными атомами меди в другой позиции.

Однако, именно конкуренция различных внутри- и междоисследовательских обменных взаимодействий и геометрическая фрустрация обменов приводят к сложной фазовой диаграмме  $\text{CuV}_2\text{O}_4$  с различными магнитными структурами и многочисленными спонтанными и индуцированными полем фазовыми переходами, понимание природы которых далеко не полно. Метаборат меди демонстрирует необычные оптические свойства. Это единственное соединение меди, в спектре которого узкие бесфононные линии (БФЛ) наблюдаются для всех  $d-d$  переходов (в обеих позициях меди,  $4b$  и  $8d$ ) [2]. БФЛ сопровождаются богатой вибронной структурой [2], ее удалось частично идентифицировать благодаря исследованию фононного спектра [3]. Недавно сообщалось о наблюдении кругового дихроизма в  $\text{CuV}_2\text{O}_4$ , меняющего знак при изменении направления магнитного поля [4], что, казалось бы, позволяло менять кристаллическую киральность посредством внешнего магнитного поля. Данное исследование вызвало острую дискуссию в научных кругах, и вызвало целый ряд комментариев и ответов на них (см. например [5]). Однако все авторы остались при своем мнении. Нам удалось показать, что наблюдаемый эффект связан с магнитным Давыдовским расщеплением и вызванным им новым магнитооптическим явлением, который мы назвали линейным антиферромагнитным дихроизмом [1].

В настоящей работе мы провели низкотемпературный эксперимент (до 1.5 К) по исследованию фазовых переходов методом линейного антиферромагнитного дихроизма, который позволил обнаружить еще один фазовый переход при температуре 2 К, после которого данный эффект полностью исчезал. Также были проведены магнитооптические исследования, которые позволили визуализировать фазовые переходы, обнаруженные нами в работе [1]. Представленные результаты интересны в контексте создания новых быстрых магнитооптических устройств и устройств спинтроники.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №15-02-04222а и гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых (МК-3521-2015.2).

#### *Список литературы*

1. Boldyrev K.N., Pisarev R.V., et al. // Phys. Rev. Lett. 2015. V.114. P.247210.
2. Pisarev R., Kalashnikova A., Schöps O., Bezmaternykh L. // Phys.Rev. B. 2011. V.84. P.075160.
3. Pisarev R., Boldyrev K., Popova M., et al. // Phys. Rev. B. 2013. V.88. P.024301.
4. Saito M., Ishikawa K., Taniguchi K., Arima T. // Phys. Rev. Lett. 2008. V.101. P.117402.
5. Lovesey S.W., Staub U. // J. Phys.: Condens. Matter. 2009. V.21. P.142201.

А.В. ИЛЬИНСКИЙ, Р.А. КАСТРО<sup>1</sup>, Л.А. НАБИУЛЛИНА<sup>1</sup>,  
М.Э. ПАШКЕВИЧ<sup>2</sup>, Е.Б. ШАДРИН

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*<sup>1</sup>Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,*  
*Санкт-Петербург*

*<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

## **МАГНИТООПТИКА НЕЛЕГИРОВАННОГО СИЛИКАТА ВИСМУТА**

Исследования эффекта Фарадея и полярного магнитооптического эффект Керра в нелегированном нецентросимметричном кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  показали, что зависимость угла поворота плоскости поляризации от напряженности магнитного поля для обоих эффектов нелинейна. Результаты интерпретированы в рамках модели комбинированного электромагнитогирационного эффекта. Электрогирационная часть вклада в угол поворота связана с формированием продольного внутреннего электрического поля, индуцированного оптической ориентацией спинов. Показано, что в суммарный гириационный эффект вносит вклад магнетизм неподеленных электронных пар Bi-O-гептаэдров.

A.V. ILINSKIY, R.A. CASTRO<sup>1</sup>, L.A. NABIULLINA<sup>1</sup>,  
M.E. PASHKEVICH<sup>2</sup>, E.B. SHADRIN

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg*  
*<sup>1</sup>The A.I. Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg*  
*<sup>2</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*

## **MAGNETO-OPTICS OF NONDOPED BISMUTH SILICATE**

Faraday and polar magneto-optical Kerr effects in nondoped  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  crystals are investigated. It is established that the dependence of the turn angle of polarization plane on magnetic field for both effects is nonlinear. The results are interpreted within the framework of combined electromagnet gyration model. Electrogyration part of the contribution is caused by the formation of the longitudinal internal electric field induced by optical spin orientation. It is shown that the magnetism of not divided electronic pairs Bi-O-heptaedra makes a contribution to the total gyration of BSO-crystal.

Исследование эффекта Фарадея и магнитооптического (МО) эффекта Керра были проведены на образцах силиката висмута, выращенных методом Чохральского и имевших размеры  $10 \times 10 \times 1$  мм. Зондирующий луч He-Ne лазера падал перпендикулярно поверхности  $\{100\}$  параллельно вектору индукции магнитного поля.

Обнаружена нелинейность и асимметрия по магнитному полю величины магнитоэлектрогирации, а также четность ее зависимости от интенсивности внешней подсветки и скорости изменения индукции магнитного поля.

Наличие сильных магнитооптических явлений в нелегированном кристалле BSO обусловлено магнетизмом неподеленных пар Bi-O-гептаэдров в условиях аномально высокого спин-орбитального взаимодействия. Асимметрия полевой зависимости угла поворота связана с четностью электрогирационного вклада. Нелинейность эффекта Фарадея определяется нелинейностью полевой зависимостью числа ориентированных по полю орбитальных моментов [1]. Наличие релаксирующего остаточного магнетизма после резкого выключения магнитного поля  $B$  с большим временем релаксации измененного магнитным полем электрогирационного вклада к своему неизменённому значению. Обнаруженное большое время (100–150 с) релаксации фотоизменений МО-эффектов к исходному значению определяется большим временем максвелловской релаксации в нелегированных кристаллах силленитов. Четность эффекта фотоизменений электромагнитогирационного угла поворота определена четностью электрогирационного вклада в общую гирацию материала. Наличие двойного нелинейного участка на кривой полевой зависимости МО эффекта Керра определяется тем, что орбитальный магнетизм нелинеен по магнитному полю, а также тем, что этот эффект развивается в приповерхностном нарушенном слое кристалла BSO, в котором, наряду с Bi-O-гептаэдрами, присутствуют внедренные полировкой Cr-O-гептаэдры, энергия химических связей которых на порядок превосходит энергию Bi-O-связей [2].

#### *Список литературы*

1. Wiehl L., Friedrich A., Haussuh E., Morgenroth W., Grzechnik A., Friese K., Winkler B., Refson K., Milman V. Structural compression and vibrational properties of  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$  sillenite from experiment and theory // Journal of Physics: Condensed Matter. 2010. V.22. No.50.
2. Adamenko D., Klymiv I., Duda V.M., Vlokh R. and Vlokh O. Electrically and magnetically induced optical rotation in  $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}:\text{Cr}$  crystals at the phase transition. 1. electrogyration effect in  $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}:\text{Cr}$  // Ukr. J. Phys. Opt. 2007. V.8. №1. P.42–53.

Е.М. КУДРЯВЦЕВ, С.Д. ЗОТОВ, А.А. ЛЕБЕДЕВ, В.В. РОЩУПКИН<sup>1</sup>

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

*<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

## **МЕДЛЕННЫЕ СОЛИТОНОПОДОБНЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ В МЕТАЛЛЕ: НОВЫЙ ПРИМЕР НАБЛЮДЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ**

С целью уменьшения числа дефектов в предварительно деформированном образце никеля, его подвергали отжигу в вакуумной печи (5 часов при  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ). Это время можно значительно сократить за счёт предварительного облучения образца 2 Гц-импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера в течение 30 часов, но уже при комнатной температуре.

E.M. KUDRIAVTSEV, S.D. ZOTOV, A.A. LEBEDEV,  
V.V.ROSHCHUPKIN<sup>1</sup>

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

*<sup>1</sup>Baykov Institute of Metallurgy and Material Science of the RAS, Moscow*

## **SLOW SOLITON-LIKE ELASTIC WAVES IN METALS: ONE MORE OBSERVATION AND APPLICATION**

To decrease the number of defects in preliminary deformed sample of nickel, it was annealed in vacuum furnace (during 5 hours at  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ). This time period could be markedly decreased by help of previous sample irradiation with the 2 Hz  $\text{CO}_2$  laser pulses during 30 hours but now at room temperature.

Для уменьшения числа дефектов в образце металла, по одной из технологий отжига его помещают в вакуумную печь на 5 часов при  $T \sim 1000^{\circ}\text{C}$ . При этом всесторонний быстрый нагрев образца *стали* (за 100-300 с до  $1000^{\circ}\text{C}$ ) [1], как показано в [2], приводит к возбуждению в образце нескольких компонентов Медленных уединённых упругих волн (МУУВ) с дискретными скоростями [3]. При аналогичном нагреве предварительно деформированных образцов *никеля* (см. рис. ниже), также возбуждается компонент МУУВ. Действительно, после половины сеанса отжига – видна группа из 10 хорошо повторяющихся акустических событий (АС). На рис. 1 средний интервал между АС составляет 421 с. Он встречается и в другом опыте и соответствует выходам на поверхность образца цилиндрической упругой волны (компонента МУУВ), двигавшейся поперёк образца с очень малой скоростью (4,75 микрон в с).

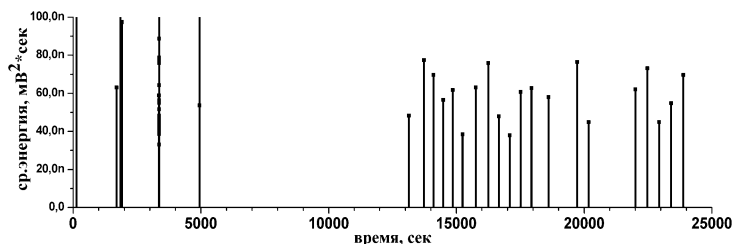


Рис. 1

Уменьшение АЭ со временем отжига, сопровождаемое многократным прохождением компонентов МУУВ через образец, – позволило двум авторам (ЕМК и ВВР) выдвинуть концепцию положительного влияния МУУВ на очистку образца от дефектов. Они выносятся упругими уединёнными волнами, имеющими дискретные скорости (компонентами МУУВ) из глубины образца к поверхности, где исчезают. Это происходит потому, что дефекты, в присутствии поверхности как 3-го тела, как известно, рекомбинируют, образуя АС, излучаемые образцом и покидающие его. Этим и объясняется увеличение скорости отжига образцов, прошедших облучение  $\text{CO}_2$ -ЛИ. Отсюда ясной становится постановка работы - применить волны типа МУУВ к очистке образцов от дефектов (см. ниже номера грантов РФФИ, полученных на исследование).

Совместными усилиями в институтах РАН – ФИАНе и ИМЕТе в 2012 и 2014 гг - были проведены 2 серии успешных опытов. После одинакового отжига 4-х пар образцов, в тех из них, которые были предварительно при  $T_{\text{комн}}$  облучены  $\text{CO}_2$ -ЛИ, было зафиксировано почти вдвое меньше АС [4].

Авторы благодарят М.М. Ляховицкого, осуществлявшего отжиг образцов, М.А. Покрасина, Дж. Нишанова, за помощь в работе, А.А. Кузнецова, Э.Н. Лоткову за полезное обсуждение результатов. Работа поддержана грантами РФФИ 10-08-01003 и 14-08-00981.

#### Список литературы

1. Roshchupkin V.V., Lyakhovitskii M.M., Minina N.A., Pokrasin M.A., Afanasiev I.A., Sobol N.L., Chernov A.L. // High Temperature. 2004. V.42. №6. P.883-887.
2. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., Lebedev A.A., Kraysky A.A., Kolokol'tsev V.N., Lyakhovitskii M.M., Roshchupkin V.V. // Proc. of XXIV session of Russ.Acoustic.Society. 2011. V.I. P.118-122.
3. Kudriavtsev E.M. // Proc. of XIII sess. of Russ.Acoustic.Society. 2003. V.I. P.204-207.
4. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., Lebedev A.A., Lyakhovitskii M.M., Roshchupkin V.V. // Book of Abstracts of ICPPP18. Novi Sad, Serbia, 2015. P.82-83.

Н.Г. ЯРЕМЕНКО, В.А. СТРАХОВ, М.В. КАРАЧЕВЦЕВА

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН*

## **ОСЦИЛЛЯЦИИ ВРЕМЕНИ ЗАХВАТА ДЫРОК В КВАНТОВЫЕ ЯМЫ ГЕТЕРОСТРУКТУР n-AlGaAs/GaAs**

Методом фотолюминесцентной спектроскопии исследован процесс захвата неравновесных дырок в квантовые ямы гетероструктур n-AlGaAs/GaAs. Показано, что зависимость отношения интенсивностей фотолюминесценции из квантовой ямы и из барьерных слоев от ширины ямы имеет осциллирующий вид. Проведена оценка времен захвата дырок в максимуме и минимуме осцилляций:  $\approx 3$  пс и  $\approx 370$  пс соответственно. Исследована динамика накопления носителей с ростом оптического возбуждения в структурах с разной скоростью захвата.

N.G. YAREMENKO, V.A. STRAKHOV, M.V. KARACHEVTSEVA

*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*

## **THE OSCILLATIONS OF HOLE CAPTURE TIME IN n-AlGaAs/GaAs QUANTUM WELL HETEROSTRUCTURES**

The excess holes capture in quantum wells of n-AlGaAs/GaAs heterostructures is investigated by photoluminescence spectroscopy. It is shown that the ratio of photoluminescence intensities from quantum well and from barrier layers is an oscillating function of quantum well width. The hole capture times in the maximum and the minimum of the oscillations are estimated ( $\approx 3$  psec and  $\approx 370$  psec respectively). The dynamics of hole collection depending on excitation intensity is studied in structures with different capture times.

Процесс захвата неравновесных носителей заряда в квантовую яму (КЯ) играет решающую роль в работе многих оптоэлектронных приборов на основе гетероструктур. При конструировании приборов необходимо учитывать особенности протекания этого процесса в зависимости от параметров структуры и воздействия внешних факторов: температуры, интенсивности возбуждения и др. Одной из особенностей этого процесса является осциллирующая зависимость скорости захвата от ширины КЯ, содержащая максимумы при совпадении высшего квантового уровня с высотой барьера [1]. Этот эффект, теоретически предсказанный давно, экспериментально исследован очень мало, особенно в отношении захвата дырок [2]. Данная работа посвящена изучению захвата дырок в структурах n-AlGaAs/GaAs методом фотолюминесценции (ФЛ). При

низких температурах отношение интенсивностей ФЛ из КЯ и из барьерных слоев описывается простым выражением [3]:  $\frac{I_{qw}}{I_b} \approx \frac{\tau_b}{\tau_s}$ . Здесь  $\tau_b$  - время жизни дырок в барьере,  $\tau_s$  - эффективное время захвата, а именно, наибольшее из двух времен: диффузии дырок к яме и локального захвата дырок. Величину  $\tau_s$  можно оценить, используя полученные из эксперимента отношения  $I_{qw}/I_b$ . Как видно на рис. 1, зависимость этого отношения от ширины КЯ имеет осциллирующий вид (пунктиром показаны расчетные значения  $L$ , соответствующие резонансу захвата дырок на 2-й, 3-й и 4-й уровни). Полагая при оценках  $\tau_b = 10^{-9}$  сек, получаем  $\tau_s = 3,2$  пс и  $\tau_s = 370$  пс в резонансе (при  $L = 18$  нм) и в минимуме осцилляций (при  $L = 13,5$  нм).

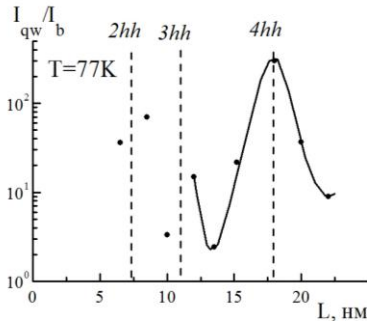


Рис. 1

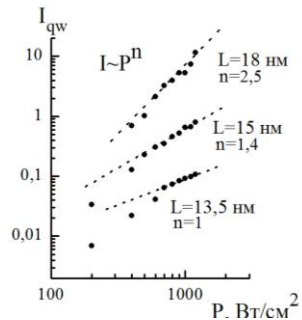


Рис. 2

Исследованы зависимости интенсивности ФЛ из КЯ от плотности оптического возбуждения в структурах с разной скоростью захвата (рис. 2). При слабом захвате эта зависимость линейна ( $n \approx 1$ ), в резонансной структуре - суперлинейна ( $n \approx 2,5$ ). Это означает, что в условиях резонанса концентрация фотовозбужденных дырок за счет их быстрого накопления, по крайней мере, на порядок выше концентрации основных электронов.

#### Список литературы

1. Козырев С.В., Шик А.Я. Захват носителей в квантовые ямы гетероструктур // ФТП. 1985. Т.19. №9. С.1667-1670.
2. Яременко Н.Г., Карачевцева М.В., Страхов В.А. Резонансный захват дырок в модулированно-легированных структурах n-AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами // Доклады АН. 2011. Т.437. №3. С.321-326.
3. Козырев С.В., Шик А.Я. Захват и рекомбинация неравновесных носителей в структурах с квантовыми ямами // ФТП. 1988. Т.22. В.1. С.105-111.



А.В. НИКОНОВ<sup>1,2</sup>, Н.И. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>,  
К.О. БОЛТАРЬ<sup>1,2</sup>, В.П. ПОНОМАРЕНКО<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион», Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

<sup>3</sup>АО «Швабе-Фотосистемы», Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОСЛОЙНЫХ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ ИК-ДИАПАЗОНА

Разработаны методики моделирования спектров пропускания многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе КРТ. Для моделирования спектров пропускания разработаны и улучшены модели показателя преломления и коэффициента поглощения исследуемых материалов. Модели демонстрируют свою эффективность для анализа гетероэпитаксиальных структур с толщиной отдельных слоёв в несколько сотен нанометров и находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными из независимых источников.

A. V. NIKONOV<sup>1,2</sup>, N. I. IAKOVLEVA<sup>1</sup>,  
K. O. BOLTAR<sup>1,2</sup>, V. P. PONOMARENKO<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>JSC «RD&P Center «Orion», Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

<sup>3</sup>JSC «Shvabe-Photosystem», Moscow

## SPECTRAL PROPERTIES OF MULTILAYER HETEROSTRUCTURES IN IR RANGE

In this research we develop various methods of modeling transmittance spectra of multilayer HES based on MCT. Models of refraction and absorption in recognized semiconductor alloys were improved due to Kramer-Kronig relations. These models include the optical parameters of nanolayers. Experimental and simulation data showed good agreement.

В последние годы в связи с совершенствованием технологии производства фотоприемных устройств с фотодиодными матрицами, предназначенных для детектирования излучения в инфракрасном диапазоне спектра, актуальной является задача контроля оптических и спектральных характеристик фотоприемников на основе полупроводниковых соединений CdHgTe [1].

Для повышения вероятности распознавания объектов наиболее перспективным является использование детектирования излучения от объектов в двух и более спектральных диапазонах [2]. Для решения такой задачи необходимы матричные фотоприемные устройства с высокой чувствительностью в указанных диапазонах спектра и чувствительными элементами, обеспечивающими детектирование излучения в этих диапазонах при его прохождении по одной оптической оси.

В работах по спектрам пропускания и отражения [3, 4] определялись состав и толщина однородных полупроводниковых пластин, состоящих из одного-двух слоёв. В современных гетероэпитаксиальных структурах твёрдых растворов КРТ присутствуют буферные, варизонные слои, а также рабочие фоточувствительные слои различного состава; поэтому становится необходимым использовать сложные математические модели, учитывающие свойства всех перечисленных слоев. В более ранних работах данные расчеты не проводились.

Разработана комплексная методика прогнозирования параметров многослойных ГЭС КРТ и матриц ИК-фотодиодов, изготовленных на их основе, по спектрам пропускания и фоточувствительности. Методика основана на минимизации функционала разницы спектров пропускания: экспериментального и рассчитанного по модели ГЭС КРТ. Полученные на её основе результаты позволили обеспечить неразрушающий входной контроль параметров и получить новые данные по характеристикам ГЭС КРТ и фотодиодов на их основе.

#### *Список литературы*

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. М.: Физматкнига, 2010.
2. Пономаренко В.П., Филачев А.М. Инфракрасная техника и электронная оптика. М.: Физматкнига, 2006.
3. Болтарь К.О., Федирко А.В. // Тезисы докладов V отраслевой конф. Аналитические методы исследования материалов и изделий микроэлектроники, М.: ЦНИИ «Электроника», 1989.
4. Болтарь К.О., Яковлева Н.И., Кашуба А.С., Удалова А.Г. Исследование характеристик эпитаксиальных слоев КРТ по спектрам пропускания // Прикладная физика. 2008. №1. С.26-31.

Н.М. КУЛЯХТИНА<sup>1,2</sup>, А.В. НИКОНОВ<sup>1,2</sup>  
Н.И. ЯКОВЛЕВА<sup>1</sup>, В.П. ПОНОМАРЕНКО<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион», Москва

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Долгопрудный

<sup>3</sup>АО «Швабе-Фотосистемы», Москва

## ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕТЕРОЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЁВ СОЕДИНЕНИЙ ГРУППЫ АЗВ5

Проведен анализ критических переходов в зоне Бриллюэна для полупроводниковых сплавов группы АЗВ5 со структурой цинковой обманки. Построены модели оптических характеристик гетероэпитаксиальных слоев на широком диапазоне длин волн.

N.M. KULYAKHTINA<sup>1,2</sup>, A.V. NIKONOV<sup>1,2</sup>  
N.I. IAKOVLEVA<sup>1</sup>, V.P. PONOMARENKO<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>JSC «RD&P Center «Orion», Moscow

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny

<sup>3</sup>JSC «Shvabe-Photosystem», Moscow

## OPTICAL PARAMETERS OF III-V HETEROEPITAXIAL LAYERS

Refractive index model was developed and plotted in dependence of InP and InGaAsP parameters in 0.5—4.0  $\mu\text{m}$  wavelength range. Analysis of transitions at critical points in the Brillouin zone for crystals with the zinc-blende arrangement of III-V compounds was made.

Матричные фотоприемники на основе четверного соединения InGaAsP являются отличным выбором для систем формирования изображений в коротковолновой области ИК-диапазона вследствие высокой квантовой эффективности и зрелости технологии их изготовления [1, 2]. Данный прямозонный полупроводниковый материал обладает высоким коэффициентом поглощения и структурным совершенством с низкой плотностью дефектов. Гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) InGaAsP/InP показывают высокую эффективность в технологии производства лазерных оптико-электронных систем пеленгации, дальнометрии, наведения и обнаружения, систем оптической связи.

Перед разработчиками фотоприемных устройств остро стоит задача контроля и трактовки характеристик ГЭС InGaAsP/InP вблизи края фундаментального поглощения: диэлектрической проницаемости, коэффициента поглощения, показателя преломления. На настоящий момент сторонними исследователями [3] получены эмпирические данные по оптическим параметрам гетероэпитаксиальных слоёв  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  различных составов. Большинство реализованных моделей характеризуют оптические характеристики эпитаксиальных слоев на ограниченном диапазоне энергии излучения.

В проведенном исследовании предложен метод вычисления оптических параметров (показателя преломления и коэффициента поглощения) двойных соединений группы АЗВ5 со структурой цинковой обманки (InP, InAs, GaAs, GaP) и четверных соединений InGaAsP на расширенном диапазоне энергий излучения. Реализована модель диэлектрической проницаемости, учитывающая прямые межзонные переходы в критических Г-, L- и X-точках зоны Бриллюэна исследуемых материалов со структурой цинковой обманки.

На основании решения соотношений Крамерса-Кронига получены теоретические зависимости показателя преломления, коэффициента экстинкции и коэффициента поглощения двойных, тройных и четверных полупроводниковых соединений различного состава. Сравнение полученных зависимостей для бинарных соединений с экспериментальными результатами [4] показало состоятельность модели.

Разработанные методы являются перспективными для решения ключевой задачи построения оптимальной топологии многослойных гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InGaAsP/InP (количество слоев, состав, толщина рабочих фоточувствительных, буферных, варизонных слоев), применяемых в технологии производства матричных фотоприемных устройств ближнего ИК-диапазона.

#### *Список литературы*

1. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотозлектроники. М.: Физматкнига, 2010.
2. Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В. Исследование темновых токов в мезоструктурных матрицах на основе InGaAs // Успехи прикладной физики. 2015. Т.3. №3. С.301.
3. Reid B., Maciejko R., Champagne A. Absorption and index of refraction for the modeling of InGaAsP/InP photonic devices // Can. J. Phys. 1993. V.71. No.9-10. P.410-416.
4. Fiedler F., Schlachezki A. Optical parameters of InP-based waveguides // Solid-State Electronics. 1987. V.30. No.1. P.73-83.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

<sup>1</sup>*Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **ПРИРОДА ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ РЕШЕТОК С СУБДИФРАКЦИОННЫМИ ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ПЕРИОДАМИ**

Предложена физическая модель формирования нанорешеток аномальной ориентации с периодами, существенно меньшими величины дифракционного оптического предела. Модель хорошо описывает известные экспериментальные результаты.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

<sup>1</sup>*Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the NRNU MEPhI,  
Ulyanovsk region*

## **NATURE OF ABNORMAL GRATING FORMATION HAVING SUBDIFFRACTION SPATIAL PERIODS**

Physical model for nanograting formation of abnormal orientation having periods less than diffraction limit values was suggested. Model well describes the known experimental data.

Взаимодействие импульсов лазерного излучения фемтосекундной длительности привлекает повышенное внимание исследователей. В частности, оставалась до конца не понятной причина образования нанорешеток аномальной ориентации [1, 2]. Для их объяснения был предложен ряд моделей, к числу которых можно отнести интерференцию поверхностных плазмон поляритонов [1], интерференцию волноводных мод ТЕ-типа в индуцированных волноводах [2] и др. Нами предложена модель, основанная на взаимной интерференции канальных (channel) и клиновых (wedge) поляритонов, возбуждаемых поляризованным лазерным излучением. В стандартных условиях воздействия лазерного излучения по нормали к поверхности процесс формирования аномальных решеток условно можно разделить на два этапа: 1) образование основных

резонансных решеток за счет интерференции падающей волны и возбуждаемых ею поверхностных поляритонов (ПП) ( $d_0 = \lambda/\eta$ ,  $\mathbf{g}_0 \parallel \mathbf{E}$ ), где  $\eta$  - действительная часть показателя преломления ПП рассматриваемой границы раздела. 2) возбуждение канальных или/и клиновых поляритонов (КП) вдоль впадин (выступов) сформированного основного рельефа и взаимной интерференции КП противоположных направлений распространения (см. рис. 1а). Согласно нелинейной математической модели периоды формируемых структур  $d = \lambda/(k\xi)$ ,  $\mathbf{g} \perp \mathbf{E}$ , где  $\xi$  - действительная часть показателя преломления КП,  $k=1, 2, 4, \dots$ . На рис. 1б приведен пример формирования аномальных решеток во впадинах основного рельефа на SiC в виде решетки локальных углублений,  $\mathbf{g} \perp \mathbf{E}$  ( $\lambda=800$  нм,  $d_0=500$  нм,  $d = \lambda/(nk\xi) \approx 60$  нм,  $n=1,33$ ,  $k=8$ ,  $\xi \approx 1,25$ ). Отметим, что образование аномальных решеток не является особенностью, присущей ультракоротким импульсам излучения и наблюдалось нами в режиме взаимодействия импульсов длительностью 10 нс на титане и длительностью порядка 100 нс на флюорите.

Экспериментально наблюдавшееся формирование аномальных решеток на металлах, полупроводниках и диэлектриках во впадинах и на выступах основного резонансного рельефа хорошо согласуется с выводами предложенной модели.

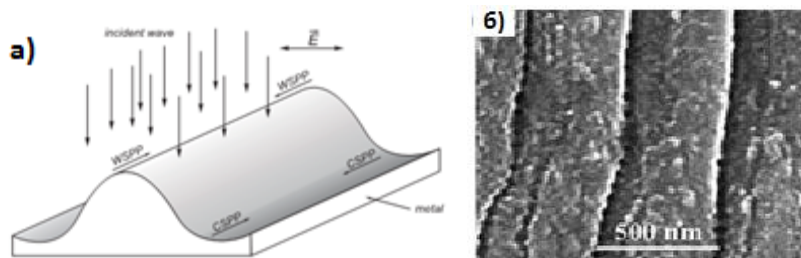


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по наблюдению формирования решеток аномальной ориентации (а); решетки нанотверстий аномальной ориентации, сформированные во впадинах основного рельефа в SiC [4], вектор напряженности электрического поля лазерного излучения  $\mathbf{E}$  направлен горизонтально (б)

#### Список литературы

1. Miyazaki K, Miyaji G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V.105. P.071103.
2. Марциновский Г.А. и др. // Оптика и спектроскопия. 2009. Т.105. №1. С.75-81.
3. Shen M., et al. // Nano Letter. 2008. V.8. No.7. P.2087.
4. Khuat V., et al. // Optics Letter. 2015. V.40. No.2. P.209.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Е.В. ЮРКОВЕЦ

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения***КОРРЕКЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПЛЕНОК  
НА ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОДЛОЖКЕ**

Предлагается методика нахождения спектров пленок на поглощающей подложке, которая позволяет рассчитать спектры пленок на свободной от поглощения подложке.

E.N. KOTLIKOV, E.V. IURKOVETS

*State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg***CORRECTION OF OPTIC SPECTRA ON ABSORPTION  
SUBSTRATE**

Method of correction spectra of films is proposed in this work. This method allows calculate film's spectra on substrate without absorption.

Спектры пленок несут важную информацию об оптических константах (ОК): коэффициентах преломления  $n(\lambda)$  и коэффициент экстинкции  $k(\lambda)$  (или поглощения  $\alpha(\lambda)$ ) материала пленки. Для их нахождения широкое применение получили спектрофотометрические методы, основанные на определении ОК пленок из спектров отражения и пропускания. Для нахождения оптических констант пленок на подложке без поглощения известны аналитические [1] и численные методы [2].

Для определения оптических констант пленок в ИК диапазоне спектра (3–25 мкм) основным материалом подложек может служить кремний. Недостатком кремния является наличие полос поглощения в этом диапазоне [3]. Для трансформации спектров предварительно необходимо провести измерения спектров пропускания и поглощения подложки, из которых можно найти  $\alpha$  – коэффициент поглощения подложки и коэффициент преломления  $n_2$  [3].

Для нахождения спектров пропускания пленки на поглощающей подложке использовался рекуррентный метод. Отражения  $R$  и пропускания  $T$  подложки с пленкой имеет вид:

$$R = R_0 + \frac{T_0^2 \rho_0 e^{-2\alpha d}}{1 - \rho_0 R_0 e^{-2\alpha d}}, \quad T = \frac{T_0 \tau_0 e^{-\alpha d}}{1 - T_0^2 \rho_0 R_0 e^{-2\alpha d}} \quad (1)$$

Здесь  $\rho_0$  – отражение,  $\tau_0$  – пропускание на границе раздела воздух-подложка.  $R_0$  -отражение,  $T_0$  - пропускание пленки на полубесконечной подложке.  $\alpha$  – коэффициент поглощения

Решение системы (1) относительно  $R_0$  и  $T_0$  имеет вид:

$$R_0 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (2)$$

$$\text{где } C = R - \left(\frac{T}{\tau_0}\right)^2 \rho_0, \quad B = 1 - R\rho_0 e^{-2\alpha d} + 2\left(\frac{T}{\tau_0}\right)^2 \rho_0^2 e^{-2\alpha d},$$

$$A = \rho_0 e^{-2\alpha d} - 2\left(\frac{T}{\tau_0}\right)^2 \rho_0^3 e^{-4\alpha d}.$$

$$T_0 = \frac{T}{\tau_0} e^{\alpha d} - \frac{T}{\tau_0} R_0 \rho_0 e^{-\alpha d} \quad (3)$$

Проверка предложенной методики проводилась с использованием модели, включающей пленку на поглощающей подложке. На рис. 1 представлены спектры: пропускания пленки на полубесконечной подложке (кривая 1), пропускания пленки на подложке конечной толщины (кривая 2), пропускание подложки (кривая 3) и поглощение подложки (кривая 4). На этом же рисунке представлены спектры пропускания пленки, скорректированных с использованием уравнений (4,5). Эти спектры совпадают со спектрами пленки на полубесконечной подложки (кривая 1 на рисунке) с точностью 0.001. Тем самым демонстрируется возможности и точность предложенного метода.

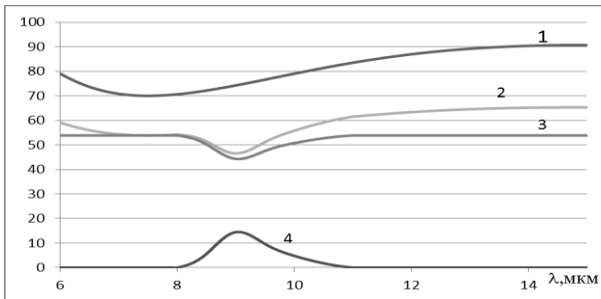


Рис. 1. Спектры пропускания и поглощения модели

#### Список литературы

1. Котликов Е.Н., Варфоломеев Г.А., Лавровская Н.П., Тропин А.Н. Проектирование, изготовление и исследование интерференционных покрытий. СПб.: ГУАП. 2010.
2. Poelman D., Smet P.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V.36. P.1850–1857.
3. Котликов Е.Н., Комарова А.М., Новикова Ю.А., Смирнова В.О., Юрковец Е.В. Дисперсионные константы кремния в области полос поглощения 400-6000 см-1 // В сборнике: Научная сессия ГУАП 2015. Сборник докладов. Ч.1. 2015. С. 208-217.



В.А. АСЕЕВ, А.Ю. БИБИК,  
Е.В. КОЛОБКОВА, Н.В. НИКОНОРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **СТРУКТУРНЫЕ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ФТОРОСОДЕРЖАЩИХ НАНОСТЕКЛОКЕРАМИК, АКТИВИРОВАННЫХ ЭРБИЕМ**

Дифференциально-термический анализ (ДТА) был использован для определения термических характеристик фторосодержащих стекол, активированных эрбием, с целью определения их температуры кристаллизации. Для получения наностеклокерамик, исходные стекла были термообработаны при температуре 480 °С в течении 240 минут. Методом рентгенофазового анализа исследованы нанокристаллические фазы, рассчитаны размеры кристаллов и определены параметры элементарной ячейки. Исследованы физико-химические и спектрально-люминесцентные свойства фторосодержащих наностеклокерамик, активированных ионами эрбия.

V.A. ASEEV, A.Yu. BIBIK,  
E.V. KOLOBKOVA, N.V. NIKONOROV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **STRUCTURAL AND SPECTRAL AND LUMINESCENCE PROPERTIES FLUORINE-CONTAINING NANOGLASSCERAMICS DOPED WITH ERBIUM**

Differential thermal analysis (DTA) was employed to characterize the thermal behavior of the fluorine-containing glasses doped with erbium in order to determine their crystallization temperatures. The virgin glass samples were heated at temperature of 480 °C during 240 minutes to obtain transparent nanoglassceramics. Nanocrystalline phases were investigated by x-ray diffraction (XRD), nano-crystallites mean size were calculated and the unit cell parameters were determine. Physical, chemical, spectral and luminescence properties of fluorine, containing nanoglassceramics doped with erbium have been investigated.

В настоящее время фторосиликатные и фторофосфатные стекла и прозрачные наностеклокерамики на их основе, активированные иттербием и эрбием, представляют большой интерес в качестве лазерных сред, усилителей и конверторов света [1-3].

В данной работе были синтезированы фторосодержащие стекла двух составов: 1)  $30\text{SiO}_2\text{-}15\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{-}18\text{PbF}_2\text{-}29\text{CdF}_2\text{-}5\text{ZnF}_2\text{-}(3\text{-}y)\text{YF}_3\text{-}y\text{ErF}_3$ , где  $y = 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2$ ; 2)  $m\text{Ba}(\text{PO}_3)_2\text{-}10\text{BaF}_2\text{-}18,5\text{CaF}_2\text{-}10\text{MgF}_2\text{-}30\text{AlF}_3\text{-}18,5\text{SrF}_2\text{-}Y\text{F}_3\text{-}n\text{ErF}_3\text{-}Y\text{bF}_3$ , где  $m = 4.25, 5$ ;  $n = 1, 2, 3, 8, 12.5$ ; состав стекол приведен в молярных процентах.

Оптимальный режим термообработки фторосодержащих стекол, активированных ионами эрбия, был определен с помощью дифференциально-термического анализа (ДТА). Термообработка исходных стекол проводилась при температуре  $480\text{ }^\circ\text{C}$  в течении 240 минут. С использованием рентгенофазового анализа, были исследованы нанокристаллические фазы, полученные после термообработки фторосодержащих стекол. Во фторосиликатных наностеклокерамиках формируется кристаллическая фаза, соответствующая кристаллу  $\text{RbY}_x\text{Er}_{(3-x)}\text{OF}_3$ . Размеры кристаллов определялись по формуле Шеррера. При выбранных параметрах термообработки, размер кристаллов составляет порядка 30 нм. Постоянные решетки для различных концентраций ионов эрбия не изменяются и равны  $5,744 \pm 0,007\text{ \AA}$ . Во фторофосфатных наностеклокерамиках выделяются две кристаллические фазы: моноклинная усовит ( $\text{Ba}_2\text{CaMgAl}_2\text{F}_{14}$ ) и кубическая  $\text{SrErF}_5$ , структурно изоморфная таким соединениям, как  $\text{BaYF}_5$ ,  $\text{BaGaF}_5$ . Размеры кристаллов кристаллической фазы  $\text{SrErF}_5$  составили 40 нм. Постоянные решетки равны  $5,6 \pm 0,01\text{ \AA}$ . Спектры люминесценции и поглощения подтверждают вхождение редкоземельных ионов (Y, Er) в кристаллическую фазу. Квантовый выход обеих систем имеет высокое значение.

#### *Список литературы*

1. Tick P.A., Borrelli N.F., Cornelius L.K., Newhouse M.A. Transparent glass-ceramics for 1300 nm amplifier applications // J. Appl. Phys. 1995. V.78. P.6367–6375.
2. Dejneka M.J. The luminescence and structure of novel transparent oxyfluoride glass-ceramics // J. Non-Cryst. Solids. 1998. V.239. P.149–155.
3. Suzuki T., Masaki S., Mizuno K., Ohishi Y. Synthesis and luminescent properties of transparent oxyfluoride glass-ceramics containing  $\text{Er}^{3+}:\text{YLiF}_4$  nanocrystals // Proc. SPIE. 2010. V.7721. P.210.

Ю.А. СТРОКОВА, С.Е. СВЯХОВСКИЙ, А.М. САЛЕЦКИЙ  
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

## **БЕЗЫЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПЕРЕНОС ЭНЕРГИИ В ОДНОМЕРНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ**

Экспериментально изучен перенос энергии электронного возбуждения между разнотипными молекулами красителей, адсорбированными в пористом кремнии (ПК) и мезопористом кремниевом одномерном фотонном кристалле (ФК). Зарегистрировано увеличение эффективности переноса энергии возбуждения  $\eta$  в ФК по сравнению с ПК и раствором красителей. Получены зависимости  $\eta$  от концентрации молекул акцептора и угла падения возбуждающего света.

Yu.A. STROKOVA, S.E. SVYAKHOVSKIY, A.M. SALETSKY  
*Lomonosov Moscow State University*

## **NONRADIATIVE INTERMOLECULAR ENERGY TRANSFER IN ONE-DIMENSIONAL POROUS SILICON PHOTONIC CRYSTAL**

An electronic energy transfer between different types of dye molecules adsorbed in a porous silicon and in a one-dimensional mesoporous silicon photonic crystal (PC) has been investigated experimentally. An increased electronic energy transfer efficiency ( $\eta$ ) in the PC in comparison with a porous silicon and a dye solution is found. Efficiency dependences ( $\eta$ ) on an acceptor molecules concentration and an incidence angle of an excitation light are derived.

В последние несколько лет наблюдается повышенный интерес к изучению флуоресценции молекул красителей в ФК. Это связано с тем, что наличие в ФК фотонной запрещенной зоны позволяет управлять не только спектральными, но и энергетическими характеристиками флуоресценции. Наиболее перспективным для этих целей является использование многокомпонентных люминесцирующих систем. В таких системах наблюдается безызлучательный перенос энергии электронного возбуждения ПЭЭВ, в связи с чем становится актуальным исследование влияния фотонной запрещенной зоны на его эффективность  $\eta$  [1].

В данной работе представлены результаты исследования ПЭЭВ между молекулами Кумарина 7 (донор) и Родамина Б (акцептор) в растворах, пористом кремнии (ПК) и одномерном мезопористом фотонном кристалле

на основе кремния. Изучались спектрально-люминесцентные характеристики как Кумарина 7 (К7), так и Родамина Б (РБ). Образцы ФК изготавливались по методике, описанной в [2].

Для всех исследованных систем наблюдался ПЭЭВ, сопровождающийся значительным тушением флуоресценции К7 при увеличении концентрации молекул акцептора (РБ). При этом эффективность переноса  $\eta$  ( $\eta = I_A / I_D$ , где  $I_A$  и  $I_D$  – интенсивности свечения молекул акцептора и донора, соответственно) различна для исследованных систем. Наблюдается значительное увеличение  $\eta$  для ФК. На рис. 1 представлены зависимости  $\eta$  от концентрации молекул акцептора  $C_{РБ}$  для трех исследованных систем. Из рис. 1 видно, что для всей исследованной области концентраций РБ для молекул, адсорбированных в пористых матрицах,  $\eta$  увеличивается, а для ФК это увеличение значительное. Это объясняется влиянием фотонной запрещенной зоны на ПЭЭВ между адсорбированными молекулами. Влияние запрещенной зоны подтверждается результатами исследования зависимости ПЭЭВ от угла освещения образца  $\alpha$ : наблюдается зависимость  $\eta(\alpha)$ . Наличие запрещенной зоны в первую очередь сказывается на энергии взаимодействия молекул донора и акцептора: в ФК наблюдается сдвиг между максимумами спектров флуоресценции молекул донора и акцептора более, чем на 10 нм.

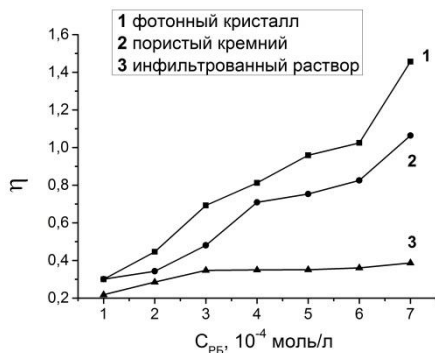


Рис. 1. Зависимость эффективности ПЭЭВ  $\eta$  от концентрации РБ  $C_{РБ}$

#### Список литературы

1. Kedia S., Sinha S. // Optics Communications. 2015. V.339. P.41-46.
2. Svyakhovskiy S.E., Maydykovskiy A.I., Murzina T.V. // Journal of Applied Physics. 2012. V.112. P.013106.

Е.В. ОСИПОВ, И.Л. МАРТЫНОВ, Д.С. ДОВЖЕНКО,  
Г.Е. КОТКОВСКИЙ, А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ТУШЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ СОПРЯЖЕННЫХ  
ПОЛИМЕРОВ, ВНЕДРЕННЫХ В МИКРОРЕЗОНАТОР  
ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ, ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПАРОВ  
НИТРОАРОМАТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

В работе исследовался эффект тушения фотолюминесценции сопряженных полимеров из класса polyphenylenevinylene (PPV), внедренных в микрорезонаторы из пористого кремния, под действием паров нитроароматических соединений. Показано, что исследуемые полимеры при внедрении в микрорезонаторы сохраняют высокую чувствительность к парам нитроароматических соединений, при этом их спектр люминесценции значительно сужается. Обсуждаются перспективы создания высокочувствительного сенсора взрывчатых веществ.

E. V. OSIPOV, I. L. MARTYNOV, D. S. DOVZHENKO,  
G. E. KOTKOVSKII, A. A. CHISTYAKOV

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

**QUENCHING OF PHOTOLUMINESCENCE OF CONJUGATED  
POLYMER IMBEDDED INTO POROUS SILICON  
MICROCAVITY IN THE PRESENCE OF NITROAROMATIC  
COMPOUND VAPORS**

We have investigated quenching of photoluminescence of PPV derivative conjugated polymers imbedded into porous silicon microcavity in the presence of nitroaromatic compound vapors. In a porous silicon microcavity polymers have demonstrated both high sensitivity to the nitroaromatic vapors and drastic narrowing of the luminescence spectrum. Using these effects coupled with a high specific surface area of porous silicon it is possible to design a new high-sensitive explosive sensor.

Несмотря на то, что существующие методы внелабораторного детектирования паров и следов взрывчатых веществ (ВВ) – спектрометрия ионной подвижности, газовая хроматография -являются экспрессными и высокочувствительными [1], потребность в создании портативных автономных устройств сенсорного типа для регистрации ВВ в настоящее время только возрастает. В связи с этим перспективным является развитие сенсорных технологий, основанных на эффекте тушения люминесценции

сопряженных полимеров. В основе эффекта тушения лежит процесс фотоиндуцированного переноса электрона с возбужденной молекулярной орбитали полимера на молекулярную орбиталь молекулы ВВ. Особый интерес представляет внедрение полимеров в пористые матрицы со свойствами фотонного кристалла, например, в микрорезонаторы (МР) из пористого кремния (ПК), что позволяет эффективно управлять спектром люминесценции различных люминофоров [2].

В работе исследовались спектрально-люминесцентные характеристики полимеров класса polyphenylenevinylene (PPV) с высоким квантовым выходом люминесценции: MDMO-PPV и ВЕНР-PPV, внедренных в МР из ПК. Микрорезонаторы изготавливались методом электрохимического травления кремния в водно-спиртовом растворе плавиковой кислоты. Длина волны собственной моды МР находилась в диапазоне 550-600 нм. Значение добротности составляло  $Q \sim 70$ . После внедрения в пористую матрицу спектр люминесценции полимеров сужался в соответствии с параметрами собственной моды микрорезонатора. Характерная ширина спектра составляла менее 10 нм.

Воздействие паров тринитротолуола (ТНТ) приводило к падению амплитуды сигнала люминесценции созданных образцов. Показано, что при концентрации паров ТНТ, равной насыщенной при 30<sup>0</sup>С ( $p_{\text{нас}} = 2 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>) падение амплитуды на 60% происходит за 5 секунд; воздействие парами ТНТ при комнатной температуре (21<sup>0</sup>С,  $p_{\text{нас}} = 5 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>) снижает амплитуду сигнала на 20% за 15 секунд. Проведено сравнение стабильности люминесцентных характеристик полимерных образцов на основе МР и тонкой полимерной пленки на кварцевой подложке. Показано, что в условиях облучения солнечным светом, излучением светодиода и в условиях полной темноты время фотостабильной работы образцов на основе МР может на порядок превышать аналогичный показатель для пленки. Установлено также, что чувствительность к детектированию ТНТ для образцов на основе МР из ПК, не хуже, чем чувствительность тонкой полимерной пленки. При этом большая удельная площадь поверхности ПК и эффект обужения спектра люминесценции полимеров в МР дают дополнительные возможности для создания эффективных систем сорбции паров ВВ и регистрации люминесцентного сигнала низкой интенсивности, что в перспективе позволит создать высокочувствительный сенсор взрывчатых веществ.

*Список литературы*

1. Martynov I.L. et. al. // Tech. Phys. Lett. 2011. V.37. No.1. P.15-18.
2. Dovzhenko D.S. et al. // Proceedings of SPIE. 2014. V.9126. P.91263O.

Ж.О. ЛИПАТОВА, Е.В. КОЛОБКОВА, Н.В. НИКОНОРОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ КЛАСТЕРОВ И КВАНТОВЫХ ТОЧЕК СЕЛЕНИДА КАДМИЯ ВО ФТОРФОСФАТНЫХ СТЕКЛАХ**

Были исследованы спектрально-люминесцентные свойства наночастиц CdSe во фторфосфатных стеклах. В результате вторичной термообработки были синтезированы молекулярные кластеры и квантовые точки с размерами 1.7, 2.5, 3.2 нм. Показано, что молекулярные кластеры характеризуются широкой полосой люминесценции в области энергий 1.8-3 эВ. Квантовые точки CdSe характеризуются люминесценцией в области энергий 1.5-2.5 эВ. Сдвиг Стокса уменьшается при росте наночастиц с 0.95 до 0.72 эВ.

Zh.O. LIPATOVA, E.V. KOLOBKOVA, N.V. NIKONOROV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **LUMINESCENCE OF CADMIUM SELENIDE MOLECULAR CLUSTERS AND QUANTUM DOTS IN FLUORINE-PHOSPHATE GLASSES**

We investigated the spectral-luminescence properties of CdSe nanoparticles in fluorine phosphate glasses. It was found the secondary heat treatment of the glasses results in formation of the molecular clusters CdSe<sub>n</sub> and quantum dots with sizes of 1.7, 2.5 and 3.2 nm. It was shown that the molecular clusters are characterized by luminescence at energies 1.8-3 eV. CdSe quantum dots are characterized by strong luminescence in the energy range 1.5-2.5 eV. Stokes shift decreases with the growth of nanoparticles from 0.95 to 0.72 eV.

Нанокристаллы CdSe обладают множеством привлекательных свойств, благодаря которым их можно использовать в биологии [1], медицине [2], оптоэлектронике [3] и оптике [4]. Изменение размеров наночастиц CdSe позволяет получать интенсивную люминесценцию от УФ до ближнего ИК-диапазона [5].

В данной работе были исследованы люминесцентные характеристики молекулярных кластеров и квантовых точек CdSe во фторфосфатных стеклах состава 0.5P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-0.25Na<sub>2</sub>O-0.1Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.05AlF<sub>3</sub>-0.05ZnF<sub>2</sub>-0.05NaF.

Край УФ поглощения стекол, активированных CdSe, находится в области ~3.5 эВ. При увеличении длительности термообработки край

фундаментального поглощения сдвигается в область меньших энергий (до 2.8 эВ). Люминесценция молекулярных кластеров характеризуется широкой полосой и при увеличении размеров кластеров сдвигается в область меньших энергий. Квантовые точки характеризуются дискретной структурой спектра поглощения. При увеличении размера квантовых точек с 1.7 нм до 3.2 нм наблюдается сдвиг спектров поглощения в область меньших энергий. Спектры люминесценции квантовых точек характеризуются симметричной полосой, обусловленной поверхностными дефектами, связанными с ловушечными состояниями. Показана зависимость сдвига Стокса от размера наночастиц. При увеличении квантовых точек с 1.7 до 3.2 нм его величина изменяется с 0.95 до 0.72 эВ.

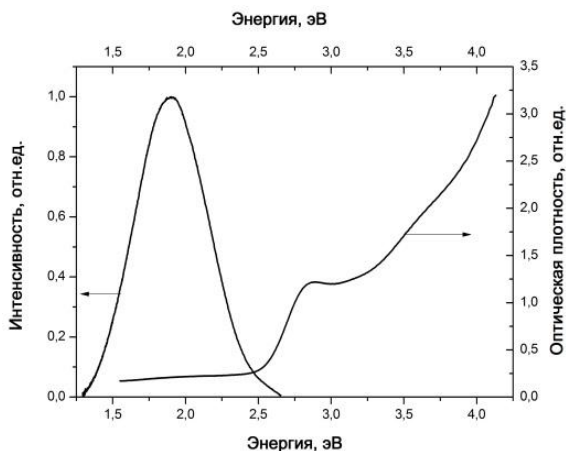


Рис. 1. Спектры поглощения и люминесценции квантовых точек CdSe диаметром 1.7 нм

#### Список литературы

1. Олейников В.А. Квантовые точки - наноразмерные сенсоры для медицины и биологии // Природа. 2010. №3. С.22–28.
2. Yu W.W., Chang E., Drezek R., Colvin V.L. Water-soluble quantum dots for biomedical applications // Biochemical and biophysical research communications. 2006. V.348. P. 781–786.
3. Войцеховский А.В., Коханенко А.П., Лозовой К.А. Оптимизация ростовых условий для улучшения параметров фотоприемников и солнечных элементов с квантовыми точками // Прикладная физика. 2014. №5. С.45-49.
4. Федоров А.В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур. Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.
5. Novak S., Scarpantonio L., Novak J., et. al. Incorporation of luminescent CdSe/ZnS core-shell quantum dots and PbS quantum dots into solution-derived chalcogenide glass films // Optical Materials Express. 2013. V.3. No.6. P.739-746.



Д.С. ДОВЖЕНКО, Е.В. ОСИПОВ, И.Л. МАРТЫНОВ,  
А.А. ЧИСТЯКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ СПОНТАННОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЮМИНОФОРОВ В ФОТОННЫХ  
КРИСТАЛЛАХ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ  
УВЕЛИЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
СЕНСОРОВ НА ИХ ОСНОВЕ**

В работе экспериментально и теоретически исследовался эффект усиления спонтанного излучения люминофоров, внедренных в фотонные кристаллы на базе пористого кремния. В качестве люминофоров использовались полупроводниковые квантовые точки и полимеры класса polyphenylenevinylene (PPV). Были проведены расчеты оптических характеристик гибридных систем, представляющих собой люминофоры, внедренные в фотонные кристаллы методом конечных разностей во временной области (FDTD). Показано, что при внедрении люминофоров внутрь фотонного кристалла происходит усиление спонтанного излучения на резонансной длине волны фотонного кристалла. Результаты данной работы позволят значительно повысить чувствительность сенсоров на основе фотонных кристаллов из пористого кремния, а также упростить производство конечных сенсорных систем.

D.S. DOVZHENKO, E.V. OSIPOV, I.L. MARTYNOV,  
A.A. CHISTYAKOV

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

**ENHANCEMENT OF LUMINOPHORE SPONTANEOUS  
EMISSION IN PHOTONIC CRYSTAL FOR IMPROVEMENT  
OF SENSOR SENSITIVITY**

In this study enhancement of spontaneous emission of luminophores embedded in porous silicon photonic crystals has been investigated. Quantum dots and PPV derivative polymers have been used for embedding inside photonic crystals. Numerical calculations of these hybrid system optical properties have been performed with the use of finite difference time domain method. It has been shown that an enhancement of spontaneous emission occurs on the photonic crystal resonant wavelength. Results of this study could be used to improve the sensitivity of sensors based on porous silicon photonic crystals and to simplify the fabrication of sensors systems.

В настоящее время существует множество сенсорных систем для диагностики малых концентраций различных веществ: маркеров заболеваний в биологических жидкостях, взрывчатых и наркотических веществ в газовой фазе [1, 2]. Одними из наиболее компактных и чувствительных являются сенсоры на основе фотонных кристаллов, обеспечивающие высокую чувствительность за счет наличия резонансных свойств и сильного влияния показателя преломления среды на их оптические свойства. При этом наиболее распространенными являются сенсоры, в которых отслеживается сдвиг резонансной полосы вследствие попадания частиц, имеющих отличный от среды показатель преломления внутрь структуры. Такой метод, однако, требует достаточно сложной и дорогостоящей аппаратуры для детектирования, что делает невозможным широкое использование сенсоров такого типа. В данной работе исследуется новый тип сенсоров, основанных на внедрении в фотонные кристаллы люминофоров, максимум спектра люминесценции которых совпадает с резонансной длиной волны фотонного кристалла. В этом случае детектируемой величиной становится интенсивность излучения в узком диапазоне частот, вследствие чего значительно упрощается система детекции для конечного сенсора.

В рамках данной работы на базе пористого кремния были изготовлены методом электрохимического травления фотонные кристаллы, в частности, микрорезонаторы, представляющие собой два брэгговских зеркала, содержащих резонансный слой между ними. В качестве подложки использовались монокристаллические пластины высоколегированного кремния р-типа. После изготовления микрорезонаторы подвергались окислению для стабилизации оптических свойств. После чего в них внедрялись люминофоры (квантовые точки и полимеры) в жидкой фазе. В нашей работе исследованы фундаментальные оптические характеристики подобных систем. Экспериментально и теоретически исследованы спектры, кинетика и пространственное распределение люминесценции. Показано усиление люминесценции люминофоров на резонансной длине волны вследствие эффекта Парселла. Показано влияние глубины внедрения на оптические свойства сенсорного элемента и как следствие чувствительность сенсоров.

#### *Список литературы*

1. Martynov I.L., et. al. Ion mobility spectrometer with ion source based on laser-irradiated porous silicon // Tech. Phys. Lett. 2011. V.37. No.1. P.15-18.
2. Threm, D., et al. Photonic crystal biosensors towards on-chip integration. // J. Biophot. 2012. V.5. P.601–616.

О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ, С.М. КОСТРИЦКИЙ<sup>1</sup>,  
М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>2</sup>, В.В. ВАСИЛЬЕВА, И.М. ЧИРКОВА

*Кемеровский государственный университет*

<sup>1</sup>*НПК Оптилинк, Зеленоград*

<sup>2</sup>*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты*

## **ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ**

Исследованы особенности широкополосной инфракрасной фотолюминесценции в легированных кристаллах  $\text{LiNbO}_3$  при селективном лазерном возбуждении. Показано, что данная люминесцентная полоса локализована в ближнем ИК-диапазоне (700-1000 нм) и зависит от вида и концентрации легирующей примеси.

O.G. SEVOSTYANOV, S.M. KOSTRITSKI<sup>1</sup>, M.N. PALATNIKOV<sup>2</sup>,  
V.V. VASIL'EVA, I.M. CHIRKOVA

*Kemerovo State University*

<sup>1</sup>*RPC Optolink Ltd, Zelenograd*

<sup>2</sup>*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **PHOTOLUMINESCENCE IN DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS**

The peculiarities of broadband infrared photoluminescence in doped  $\text{LiNbO}_3$  crystals were investigated at laser excitation within specific wavelength. It has been established, that the related emission band is observed within near-IR range (700-1000 nm) and is dependent on type and concentration of dopant.

Кристаллы  $\text{LiNbO}_3$  и активные оптические волноводы на их основе нашли широкое применение в нелинейной и интегральной оптике благодаря удачному сочетанию физических свойств. При этом параллельное развитие техники экспериментальных исследований позволяет обнаруживать новые особенности этих хорошо изученных материалов. Так, ранее нами [1] были исследованы процессы появления в химически восстановленных монокристаллах  $\text{LiNbO}_3$  и  $\text{LiTaO}_3$  широкополосной инфракрасной фотолюминесценции (ИКФЛ) при селективном лазерном возбуждении. Было показано, что в  $\text{LiNbO}_3$  данная

люминесцентная полоса: а) может быть обнаружена совместно со спектром КРС при интенсивной лазерной накачке в красном участке видимого диапазона длин волн; б) преимущественно локализована в ближнем ИК-диапазоне (700-1000 нм); в) имеет нелинейную зависимость от мощности возбуждающего лазерного излучения; г) выход ИКФЛ в  $\text{LiNbO}_3$  сильнейшим образом зависит от композиционного состава и степени химического восстановления образцов кристаллов. К разработке феноменологической модели явления ИКФЛ в  $\text{LiNbO}_3$  нами была привлечена концепция поляронной рекомбинационной люминесценции [2]. Для уточнения этой концепции и поиска возможных путей управления квантовым выходом ИКФЛ проведено комплексное исследование интенсивности люминесценции в специально легированных кристаллах ниобата лития, в которых помимо наличия примесных дефектов возможно формирование дефектных комплексов смешанной природы.

В работе нами использованы объемные кристаллы:  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Mg}$ ,  $\text{LiNbO}_3\text{:Zn}$ . Спектры ИКФЛ регистрировались совместно с основным спектром КРС в геометрии обратного рассеяния с помощью спектрометра HORIBA LabRAM HR800. Использовано излучение накачки с длиной волны 632,81 нм. Установлено, что полоса ИКФЛ наблюдается в одинаковом спектральном диапазоне (700 - 1000 нм) и имеет одинаковую форму в спектрах номинально чистых и всех поразному легированных кристаллов. Интегральная интенсивность этой полосы зависит от технологии легирования, т.е., от условий формирования дефектных комплексов с участием собственных и примесных дефектов кристалла. С использованием техники конфокальной фильтрации в оптическом тракте спектрометра установлено, что люминесцентный отклик характеризуется малоугловой индикатрисой, отличной от индикатрисы спонтанного КРС кристаллов  $\text{LiNbO}_3$ . Полученные данные позволили использовать ИКФЛ для контроля однородности химического состава кристаллов ниобата лития, используемых для изготовления интегрально-оптических устройств.

#### *Список литературы*

1. Kostritskii S.M., Sevostyanov O.G., Bourson P., Aillierie M., Fontana M.D., Kip D. Comparative study of composition dependences of photorefractive and related effects in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  crystals // *Ferroelectrics*. 2007. V.352. P.61-71.
2. Kostritskii S.M., Aillierie M., Margueron S., Bourson P. Gated luminescence in as-grown and reduced undoped  $\text{LiNbO}_3$  crystals // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V.416. P.012033.

**Е. ПАНТЕЛЕЙ, В.Д. ПАРАНИН**

*Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. С.П. Королёва*

## **СПЕКТРЫ ПРОПУСКАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ НИОБАТА ЛИТИЯ В ОБЛАСТИ ОТ 190 ДО 25000 НМ**

Измерены спектры пропускания и отражения ниобата лития Z- и X-среза в диапазоне длин волн от 190 до 25 000 нм. Отмечены характерные полосы поглощения и спектральные различия кристаллов ниобата лития разных срезов.

**PANTELEI E., PARANIN V.D.**

*Samara State Aerospace University*

## **TRANSMISSION AND REFLECTION OF LITHIUM NIOBATE IN 190-25000 NM WAVELENGTH BAND**

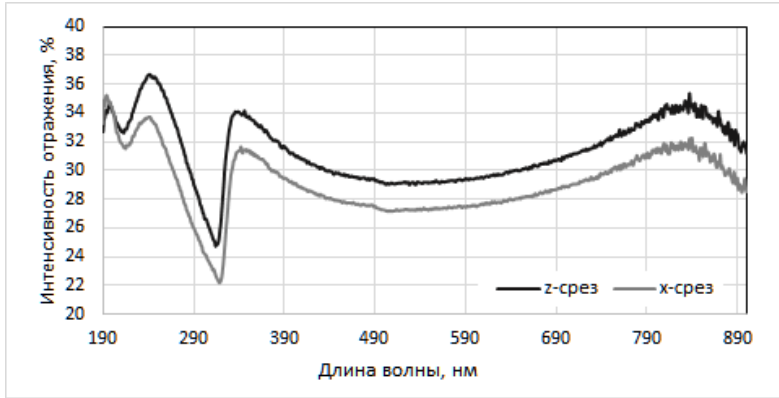
Transmission and reflection of Z-cut and X-cut lithium niobate and measured in the range 190 – 25000 nanometers. Characteristic band of absorption and spectral differences of various cut are noted.

В качестве экспериментальных образцов использовались кристаллы ниобата лития X-среза номинальной толщиной 1,00 мм и Z-среза толщиной 0,5 мм производства фирмы «ЭЛАН+» (Россия, Санкт-Петербург). Кристаллы полировались алмазной суспензией до чистоты поверхности РШ по ГОСТ 11141-84, неплоскостности поверхности - не более 10", шероховатости  $R_a < 2$  нм. Перед измерениями поверхности кристаллов проходили химическую очистку от органических и неорганических соединений.

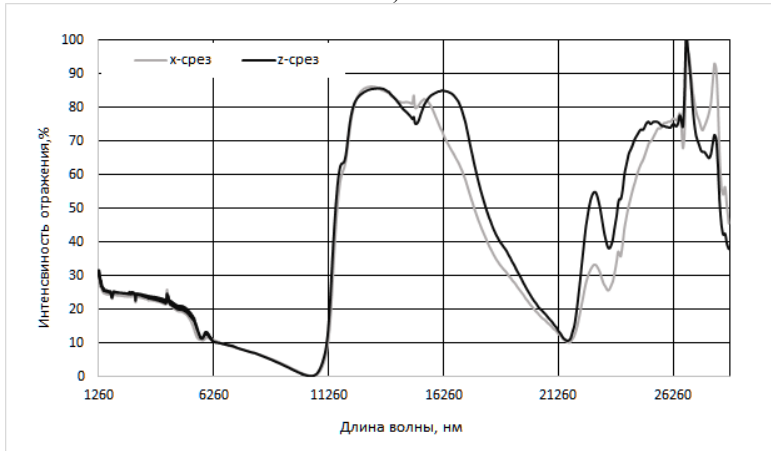
Исследования спектров пропускания и отражения проводились на спектрофотометрах Shimadzu UV-2450 для диапазона 300 – 900 нм и Shimadzu IRPrestige 21 в диапазоне 1250 – 25000 нм.

Спектры пропускания были измерены ранее [1]. Кристаллы ниобата лития прозрачны по уровню 0,5 в диапазоне от 320 до 5500 нм. В ближнем и среднем инфракрасном диапазоне присутствуют ярко выраженные полосы, несущую в себе информацию о примесях. Так, например, полоса на длине волны 2800 – 2900 нм, соответствует валентным колебаниям ОН-группы [2]. Существенное различие между Z- и X- срезами проявляется в диапазоне 5500 – 7000 нм.

Спектры отражения ниобата лития представлены на рис. 1.



а)



б)

Рис. 1. Спектры отражения ниобата лития в диапазоне 190 – 28000 нм

В ультрафиолетовой области отмечен существенно неоднородный характер отражения, несущую информацию о фотостимулированных физико-химических процессах.

#### Список литературы

1. Паранин В.Д., Пантелей Е. Спектр пропускания ниобата лития различных производителей // IV Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.224-225.
2. Колесников О.М., Кострицкий С.М. Водород в ниобате лития // Автотметрия. 1995. №4. С.60-67.

А.И. ИЛЛАРИОНОВ, Е.А. ИЛЛАРИОНОВА<sup>1</sup>, О.Л. НИКОНОВИЧ  
*Иркутский государственный университет путей сообщения*  
<sup>1</sup>*Иркутский государственный медицинский университет*

## ОПТИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РИФАМПИЦИНА

Исследовались спектры поглощения и нелинейно-оптические свойства рифампицина. Полосы поглощения рифампицина с максимумами на длинах волн  $234\pm 1$  нм,  $260\pm 1$  нм относятся к переходам валентного электрона, локализованного на атоме углерода в бициклической структуре рифампицина ( $\pi$ - $\pi^*$  переход). Полоса поглощения рифампицина с максимумом на длине волны  $342\pm 1$  нм относится к переходу электрона, локализованного на атоме кислорода в карбонильной группе, с занятой  $p$  - орбитали на вакантную  $p$  - орбиталь ( $\pi$ - $\pi^*$  переход). Полоса поглощения рифампицина с максимумом на длине волны  $475\pm 1$  нм обусловлена переходом валентного электрона в хромоформе  $C=N$  с занятой  $p$  - орбитали на вакантную  $p$  - орбиталь ( $\pi$ - $\pi^*$  переход). В результате проведенных экспериментов было определено, что рифампицин неэффективно генерирует вторую гармонику инфракрасного излучения ( $\lambda=1064$  нм).

A.I. ILLARIONOV, E.A. ILLARIONOVA<sup>1</sup>, O.L. NICONOVICH  
*Irkutsk State Transport University*  
<sup>1</sup>*Irkutsk State Medical University*

## OPTICAL AND NONLINEAR OPTICAL PROPERTIES OF RIFAMPICIN

The absorption spectra and nonlinear optical properties of rifampicin were investigated. Absorption bands of rifampicin with a maximum at wavelengths  $234\pm 1$  nm,  $260\pm 1$  nm belong to the transition of valence electrons localized on the carbon atom in the bicyclic structure of rifampicin ( $\pi$ - $\pi^*$  transition). Absorption band of rifampicin with a maximum at a wavelength  $342\pm 1$  nm refers to the transition of an electron localized on the oxygen atom in the carbonyl group with a busy  $p$  - orbitals of the vacant  $p$  - orbital ( $\pi$ - $\pi^*$  transition). The absorption band of rifampicin with a maximum wavelength  $475\pm 1$  nm due to remove the valence electron in hromoforme  $C=N$  with busy  $p$  - orbitals on vacanting  $p$  - orbital ( $\pi$ - $\pi^*$  transition). As a result of experiments, it was determined that the rifampin inefficiently generates a second harmonic infared radiation ( $\lambda = 1064$  nm).

Молекулярные кристаллы бесконечно разнообразны и могут сравнительно легко модифицироваться введением примесей и

небольшими изменениями самих молекул. Установление связи между строением слагающих кристалл молекул и оптическими свойствами кристаллов открывает широкие возможности их применения в различных областях науки и техники.

Рифампицин является бициклическим производным, в структуру рифампицина входит карбонильная группа и хромоформ  $C=N$ .

Экспериментальные исследования спектров поглощения рифампицина показало следующее. В спектрах поглощения рифампицина при переходе от рН 12,5 к рН 1,1 происходит смещение минимумов поглощения как в длинноволновую, так и в коротковолновую области спектра. При рН 1,1 спектр поглощения рифампицина характеризуется четырьмя полосами поглощения с максимумами на длинах волн  $230\pm 1$  нм,  $266\pm 1$  нм,  $336\pm 1$  нм и  $475\pm 1$  нм. При рН 6,9 спектр характеризуется четырьмя полосами поглощения с максимумами на длинах волн  $234\pm 1$  нм,  $260\pm 1$  нм,  $342\pm 1$  нм и  $475\pm 1$  нм. При рН 5,4 спектр имеет четыре максимума на длинах волн  $238\pm 1$  нм,  $256\pm 1$  нм,  $334\pm 1$  нм и  $475\pm 1$  нм. При рН 12,1 спектр характеризуется четырьмя полосами поглощения с максимумами  $236\pm 1$  нм,  $260\pm 1$  нм,  $328\pm 1$  нм, и  $475\pm 1$  нм. Для объяснения природы полос поглощения в молекуле рифампицина были проведены теоретические исследования спектров поглощения отдельно бициклической структуры, бициклической структуры с пиперазиновым кольцом и бициклической структуры с карбонильной группой.

Согласно расчету в приближении ZINDO/S получено, что линия поглощения структурного фрагмента рифампицина, содержащего бициклическую структуру и пиперазин, на длине волны  $402,76$  нм, соответствующая максимуму полосы поглощения  $342\pm 1$  нм (рН 6,9), обусловлена переходом электрона с атомной орбитали  $p_z$  - атома углерода на атомную орбиталь  $p_z$  - атома азота в двойной связи  $C=N$ . Линия поглощения структурного фрагмента рифампицина, содержащего бициклическую структуру и карбонильную группу, на длине волны  $373,73$  нм, соответствующая максимуму полосы поглощения  $475\pm 1$  нм (рН 6,9), обусловлена переходом электрона с атомной орбитали  $p_z$  - атома углерода на атомную орбиталь  $p_z$  - атома кислорода в двойной связи  $C=O$ .

В работе приводятся результаты экспериментальных исследований генерации второй оптической гармоники ИК-излучением ( $\lambda=1064$  нм) в кристалле рифампицина порошковым методом, которые показали неэффективность использования данного кристалла для преобразования излучения в ближней ИК области, что можно объяснить незначительным поглощением рифампицином излучения в данной области спектра.



**В.В. ДЁМИН, И.Г. ПОЛОВЦЕВ, Д.В. КАМЕНЕВ**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

## **УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ $ZnGeP_2$**

Предложен способ контроля качества монокристаллов оптическими методами. Оработана методика выявления внутренние дефекты монокристаллов

**V.V. DYOMIN, I.G. POLOVTSEV, D.V. KAMENEV**

*National Research Tomsk State University*

## **QUALITY CONTROL DEVICE FOR $ZnGeP_2$ MONOCRYSTALS**

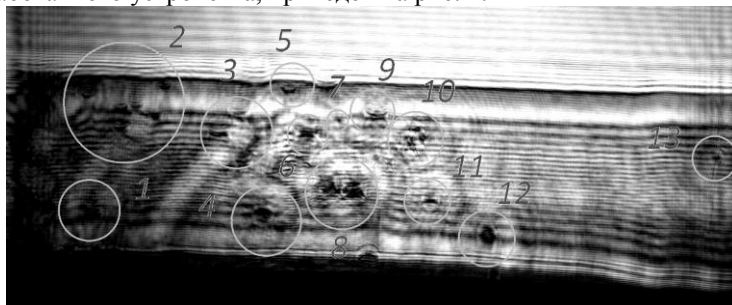
Technique of  $ZnGeP_2$  monocrystals quality control using optical methods is suggested. The procedure of internal defects in monocrystal detection is tested

Монокристаллы  $ZnGeP_2$  [1-3] применяются для преобразования частоты лазерного излучения в средний инфракрасный и терагерцовый диапазоны, и используются при создании приборов для спектроскопии, медицинских исследований, обнаружения утечек газов, системы бортового подавления ПВО и др. Среди полезных свойств монокристаллов следует отметить высокий порог оптического пробоя, хорошую теплопроводность, механическую прочность, стойкость к условиям повышенной влажности и к агрессивным средам.

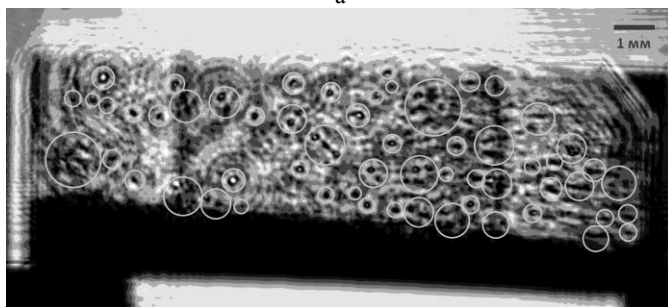
В готовых образцах  $ZnGeP_2$  могут присутствовать дефекты, наличие которых приводит к ухудшению полезных свойств образцов, их надёжности и ограничению применимости (например, использование кристаллов в ВПК). Дефекты можно разделить на две группы: внешние, связанные с технологией раскройки и обработки образцов, и внутренние, определяемые технологией роста монокристаллов. Выявление последних затруднительно, поскольку кристалл непрозрачен в видимом диапазоне. Используемый в настоящее время контроль качества выполняется путём испытания готового образца на разрушение. Данный метод позволяет сократить количество претендентов, однако не гарантирует отсутствия внутренних дефектов в монокристаллов. Напротив, кристаллы, имевшие дефекты и «успешно» прошедшие лучевые испытания и, могут стать непригодными для дальнейшего использования.

В работе предложен бесконтактный метод выявления внутренних дефектов готовых образцов до проведения испытаний на лучевую

стойкость, основанный на регистрации теневых проекционных изображений. В качестве источника излучения используется АYG:Nd-лазер с длиной волны 1053 нм, для которой монокристалл имеет окно прозрачности. Пример обработанных данных, полученных с помощью разработанного устройства, приведён на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Примеры обнаруженных внутренних дефектов в кристалле  $\text{ZnGeP}_2$

Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенный метод позволяет обнаружить внутренние дефекты монокристаллов  $\text{ZnGeP}_2$ , определить их размер и пространственное положение. Разрешение прибора определяется реализованной в нём оптической схемой, в случае необходимости может быть повышено за счёт уменьшения поля зрения.

#### *Список литературы*

1. Zawilski K.T., Setzler S.D., Schunemann P.G., Pollak T.M. Increasing the laser induced damage threshold of single crystal  $\text{ZnGeP}_2$  // J. Opt. Soc. Am. B. 2006. V.23. No.11.
2. Чучупал С.В., Командин Г.А., Жукова Е.С. // Физика твердого тела. 2014. Т.56. Вып.1.
3. Вайполин А.А., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В., Ушакова Т.Н. // Физика и техника полупроводников. 1999. Т.33. Вып.12.

Д.С. УМРЕЙКО, А.П. ЗАЖОГИН, А.И. КОМЯК  
*Белорусский государственный университет, Минск*

**ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ КИСЛОРОДА НА ПРОЦЕССЫ  
ФОТОХИМИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НАНОКЛАСТЕРОВ  
УРАНА ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ В РАСТВОРАХ  
УРАНИЛПЕРХЛОРАТА В АЦЕТОНЕ**

В системах  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  в ацетоне с добавлением нитрата кальция при облучении их излучением (область 420-440 нм) в герметичных кюветах происходит фотополимеризация ацетона, а катализатором процесса являются возбужденные комплексы уранила. В спектрах тех же образцов растворов облученных в кюветах с доступом кислорода воздуха наблюдается появление полос, принадлежащих комплексам трех- четырех- и пятивалентного урана.

D.S. UMREIKO, A.P. ZAJOGIN, A.I. KOMYAK  
*Belarusian State University, Minsk*

**PECULIARITIES OF THE OXYGEN EXERTED EFFECTS  
ON THE PROCESSES OF PHOTOCHEMICAL FORMATION  
OF THE VARIABLE VALENCE URANIUM COMPLEXES  
IN SOLUTIONS OF URANYL PERCHLORATE IN ACETONE**

In  $\text{UO}_2(\text{ClO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  systems in acetone with addition of calcium nitrate under irradiation in the region 420-440 nm in sealed cells the photopolymerization process of acetone takes place, excited uranyl complexes being its catalysts. But in spectra of the same samples of the solutions irradiated in the cells with the oxygen access one can observe the bands associated with the complexes of three-, tetra-, and pentavalent uranium.

В работе [1] было показано, что модельные жидкие радиоактивные органические отходы (ЖРОО), содержащие кетонные растворители (ацетон) и уранил могут, при оптическом облучении в области 400-420 нм, переведены в желеобразные, содержащие продукты поликонденсации кетонов и уран в различных валентных состояниях. Ионы уранила могут служить на свету либо окислителями, либо сенсibilизаторами реакции окисления другими окислителями, в частности молекулярным кислородом (автоокисление). В связи с наложением этих двух явлений результаты фотохимических исследований в случае наличия доступа воздуха к системе могут быть разнообразными.

Для исследования влияния кислорода воздуха и физико-химических свойств растворов на процессы фотохимического образования комплексов урана нами были использованы спектры электронного поглощения. В качестве объектов исследования нами были выбраны растворы уранилперхлората в ацетоне с добавлением нитрата кальция (2,5 мл 0,45 М УПХА + 125 мкл раствора  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (2М) в ацетоне).

Регистрация спектров электронного поглощения в области 335-1000 нм осуществлялась на автоматическом спектрофотометре ПВА (производитель СП «Солар ТИИ»). Облучение проводилось в герметичных кюветах с доступом воздуха (в), с ограниченным доступом воздуха (пг) и без доступа (г). Совместные результаты для сравнения для всех исследованных систем представлены на рис. 1.

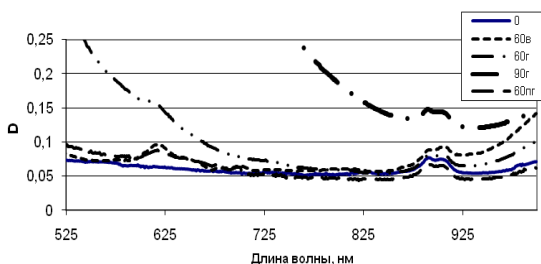


Рис. 1. Спектры поглощения комплексов урана переменной валентности: 60 мин с доступом и ограниченным доступом воздуха (60 в и 60 пг) и 60 и 90 мин (60 г и 90 г) – без доступа воздуха

Сравнение спектров свидетельствует о различии видов образующихся комплексов урана и их координационного окружения. Видно, что в системах с доступом кислорода воздуха при облучении в области 625-650 нм появляются новые полосы, принадлежащие комплексам четырех и пятивалентного урана, а около 900 нм обнаруживается поглощение комплексов трехвалентного урана. В системах без доступа воздуха слабая полоса 625 нм при облучении в течение 60 мин появляется на фоне сильного увеличения поглощения продуктами поликонденсации ацетона. В дальнейшем (90 мин), на фоне сильного поглощения света продуктами поликонденсации, она практически не наблюдается.

#### Список литературы

1. Зажогин А.П., Зажогин А.А., Комяк А.И., Умрейко Д.С. Фотопреобразование и фотокаталитическая активность уранила в ацетоновых растворах. // Журн. прикл. спектр. 2007. Т.74. №5. С.565-568.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ, А.И. СТАНКЕВИЧ, А.В. ТРОФИМОВА  
*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ КОМПОЗИЦИЯ ДЛЯ ФОТООРИЕНТАЦИИ ЖК МАТЕРИАЛОВ**

Обнаружена и исследована объемная (фотонаведенное двулучепреломление) и поверхностная (фотоориентация ЖК) фотоанизотропия композиций ЖК мономера и полимеров бензальдегидного типа, создаваемая продуктами фотопревращений бензальдегидных фрагментов под действием линейно-поляризованного УФ излучения. Высокое качество фотоориентации подтверждается предельным двулучепреломлением и низкой дефектностью фазовых пленок на основе ЖК мономера, сформированных на композитном слое.

U.V. MAHILNY, A.I. STANKEVICH, A.V. TROFIMOVA  
*Belarusian State University, Minsk*

## **PHOTOSENSITIVE COMPOSITION FOR PHOTOALIGNMENT OF LC MATERIALS**

The volume photoanisotropy (photoinduced birefringence) and surface photoanisotropy (LC photoalignment) of compositions of LC monomer – benzaldehyde polymer, created by benzaldehyde photoproducts upon polarized UV radiation have been revealed and investigated. A high quality of photoalignment is confirmed by an extreme value of birefringence and low imperfection of phase plates fabricated on the basis of LC monomer on composite layer.

Настоящая работа является продолжением исследований ориентирующих свойств бензальдегидсодержащих полимеров (БП). В этих полимерах под действием УФ излучения происходит эффективное сшивание боковых бензальдегидных групп, как между собой, так и с основной цепью полимера. При действии линейно-поляризованного УФ излучения возникающая трехмерная сетка способна демонстрировать фотонаведенное двулучепреломление (ФДЛП) [1] и эффект фотоориентации ЖК [2]. Однако фотоориентация характеризуется примерно на порядок более слабой азимутальной энергией сцепления, чем при натирании этих полимеров. Используя в качестве ориентируемого материала ЖК мономер (ЖКМ), на фотоориентирующем БП слое удастся достичь величины двулучепреломления ( $dn$ ) ЖКМ  $\sim 0,07$  (при максимально возможном значении  $dn$  для этого ЖКМ до 0,2).

Недавно было показано [3], что линейно-поляризованное облучение создает в объеме слоя композиции БП и ЖКМ ФДЛП  $\sim 0,01$ , что на порядок выше, чем для чистого БП.

В настоящей работе проведено исследование возникновения ориентации ЖКМ в слоях композиций ЖКМ-БП под действием линейно-поляризованного УФ излучения и возможности использования этих материалов для фотоориентации ЖК. Показано, что при экспонировании линейно-поляризованным УФ излучением в объеме слоя композиции возникает положительное ФДЛП с  $dn \sim 0,006$ , свидетельствующее об ориентации ЖК молекул под действием фотохимических превращений. Ориентация ЖКМ происходит также на поверхности слоя композиции. Это вызывает фотоориентацию чистого ЖКМ, нанесенного на облученный слой ЖКМ-БП. Были изучены зависимости положительного двулучепреломления ЖКМ слоев, ориентированных поверхностью композиций ЖКМ-БП, от времени линейно-поляризованного облучения ориентирующего слоя. Кинетика ориентирующей способности характеризуется резким нарастанием величины  $dn$  и после достижения максимума более плавным ее падением (рис. 1а). Об эффективности фотоориентации свидетельствует величина  $dn$  фазовых пленок, близкая к предельной, и созданные на основе ЖКМ фазовые пленки с радиальным распределением директора (рис. 1б).

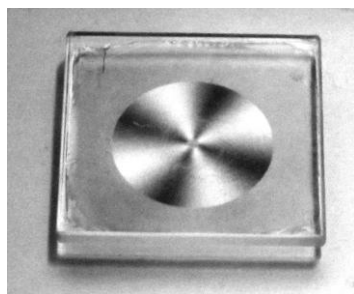
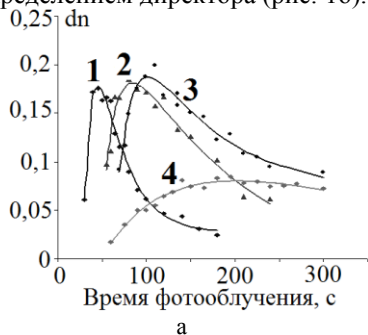


Рис. 1. Зависимости двулучепреломления ЖКМ слоев (а), ориентированных слоями композиций ЖКМ-БП, от времени облучения ориентирующего слоя при соотношении ЖКМ:БП 10:1 (1), 7:1 (2), 5:1 (3), 3:1 (4) и фотография фазовой пленки с радиальным распределением директора в скрещенных поляризаторах (б)

#### Список литературы

1. Mahilny U.V., Trofimova A.V. // J. Opt. 2011. V.13. №10. P.105601.
2. Trofimova A.V., Mahilny U.V. // JOSA B. 2014. V.31. Is.5. P.948 – 952.
3. Могильный В.В., Станкевич А.И., Трофимова А.В. // Вестн.БГУ. Сер.1. 2015. №1. С.9-13.

М.А. ГОРЯЕВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,  
Санкт-Петербург*

## **СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ФОТОЭФФЕКТА В КРЕМНИИ КРАСИТЕЛЯМИ**

Исследована фотопроводимость на постоянном токе порошкообразного кремния. Показано, что органические красители на поверхности микрокристаллов эффективно увеличивают внутренний фотоэффект в полосе поглощения красителей.

М.А. GORYAEV

*The A.I. Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg*

## **SENSITIZATION OF INTERNAL PHOTOEFFECT IN SILICON BY DYES**

The photoconductivity of the powdered silicon are investigated on the direct current. There is shown organic dyes on the semiconductor microcrystal surface effectively increase internal photoeffect in the dye absorption band.

В фотографии на основе галогенидов серебра сенсбилизация красителями является наиболее эффективным способом управления уровнем и спектром чувствительности фотографических материалов [1-4], а солнечные ячейки с использованием частиц двуокиси титана с сенсбилизующими красителями предлагаются как альтернативные кремниевым солнечным батареям [5]. Ионовым и Акимовым была показана возможность спектральной сенсбилизации красителями СВЧ-фотопроводимости узкозонных полупроводников [6].

В настоящей работе исследована фотопроводимость кремния на постоянном токе и обнаружена её эффективная сенсбилизация в области поглощения красителей [7]. Исследования спектров фотопроводимости кремния с нанесенными на поверхность полупроводника красителями показали, что фотопроводимость окрашенных образцов в области поглощения красителей более, чем на порядок выше фотопроводимости неокрашенного кремния. Величина наблюдаемого эффекта сенсбилизации фототока зависит от количества нанесенного на поверхность полупроводника красителя: при увеличении концентрации красителя фотопроводимость сначала растет, а затем происходит

уменьшение фототока. Рост фотопроводимости в области поглощения красителя не может быть связан с генерацией носителей в слое красителя, поскольку темновая проводимость как порошкообразных слоев красителей, так и нанесенных из раствора на кварцевую пластинку с электродами тонких пленок на несколько порядков меньше, чем проводимость неокрашенных кремниевых образцов, а фотопроводимость совсем отсутствует. При большом количестве нанесенного красителя на кремнии образуется сплошная изолирующая пленка, что препятствует переходу носителей заряда между микрокристаллами полупроводника.

Для большинства красителей в адсорбированном состоянии наблюдается ужесточение структуры молекулы и вероятность внутримолекулярной конверсии становится несущественной, поэтому на диэлектриках квантовый выход люминесценции адсорбированных красителей составляет десятки процентов, а на металлах, узкозонных полупроводниках и хорошо сенсibiliзируемых фоточувствительных широкозонных полупроводниках (например, галогенидах серебра и окиси цинка) свечение отсутствует вследствие эффективной передачи энергии фотовозбуждения адсорбенту [1, 3, 8]. В кремнии данный интервал энергий соответствует переходам электронов из валентной в зону проводимости, поэтому плотность состояний, способных акцептировать энергию фотовозбуждения от красителя, достаточна для полного тушения люминесценции. Значительное увеличение эффективности генерации свободных носителей при передаче энергии от красителя по сравнению с поглощением в собственной области полупроводника обусловлено тем, что это поглощение формируется непрямыми электронными переходами.

Обнаруженная сенсibiliзация красителями внутреннего фотоэффекта в кремнии может быть использована в полупроводниковых устройствах преобразования световой энергии в электрическую таких, как солнечные батареи или ПЗС-матрицы [9, 10].

#### *Список литературы*

1. Акимов И.А., Горяев М.А. // Ж. физ. хим. 1984. Т.58. №5. С.1104.
2. Шапиро Б.И. Теор. начала фотогр. процесса. М.: Эдиториал УРСС, 2000.
3. Горяев М.А. Физ. осн. фотохимии тв. тела. Saarbrucken: Lambert Acad. Publ. 2013.
4. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Сб.тр. III Всеросс. конф. по фот. и инф. опт. 2014. С.109.
5. Gratzel M. / J. Photochem. Photobiol.C: Photochem.Rev. 2003. V.4. №2. P.145.
6. Ионов Л.Н., Акимов И.А. // Письма в ЖТФ. 1975. Т.1. В.3. С.881.
7. Горяев М.А. // Ж. физ. хим. 2015. Т.89. №12. С.1940.
8. Горяев М.А. // Опт.и спектр. 1981. Т.51. Вып.6. С.1016.
9. Афанасьев В.П., Теруков Е.И., Шерченков А.А. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния. СПб.: Изд.СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
10. Горяев М.А., Дудников Ю.А. // ЖНиПФиК. 1990. Т.35. №5. С.386.



С.В. САПАРИНА, С.С. ХАРИНЦЕВ, А.М. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
<sup>1</sup>*Назарбаев университет, Астана, Казахстан*

**ВОЗМОЖНОСТИ СПЕКТРОСКОПИИ  
КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ  
И ИК-МИКРОСКОПИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ  
БИНАРНЫХ ПОЛИМЕРОВ С СУБВОЛНОВЫМ  
ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ**

В работе рассматриваются два метода колебательной спектроскопии: спектроскопии усиленного антенной комбинационного рассеяния света TERS (англ. аббр. – «Tip-Enhanced Raman Spectroscopy») и инфракрасной сканирующей ближнеполевой микроскопии IR-SNOM (англ. аббр. – «Infrared Scanning Near-field Optical Microscopy») с целью оценки их возможностей для визуализации структуры бинарных полимеров с субволновым пространственным разрешением.

S.V. SAPARINA, S.S. KHARINCEV, A.M. LEKSEEV<sup>1</sup>  
*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan*  
<sup>1</sup>*Nazarbaev University, Astana, Kazakhstan*

**POSSIBILITIES OF TERS AND IR-SNOM  
FOR VISUALIZATION OF BINARY POLYMERS  
WITH SUBWAVELENGTH SPATIAL RESOLUTION**

The paper considers the comparative analysis of the two methods of vibrational spectroscopy: TERS ("Tip-Enhanced Raman Spectroscopy") and IR-SNOM («Infrared Scanning near-field Optical Microscopy») to assess their capacity for visualization the structure of binary polymers with subwavelength spatial resolution.

Основная задача ближнеполевой микроскопии – неdestructивный анализ материалов за пределом дифракции света. В колебательной микроскопии субволновое пространственное разрешение достигается путем использования оптических антенн, которые локализуют поля через возбуждения поверхностных плазмонов.

В качестве объекта исследования был использован бинарный полимер, состоящий из последовательных слоев полиамида в полиэтилене низкой плотности. С помощью микротомы был вырезан образец, толщиной 250 нм. Целью работы является визуализация и идентификация полиамида в полиэтилене с помощью плазмонной микроскопии высокого разрешения.

Тонкие слои полиамида в полиэтилене низкой плотности удалось визуализировать с пространственным разрешением 60 нм методом IR-SNOM (рис. 1) и 65 нм – методом TERS (рис 2а, б).

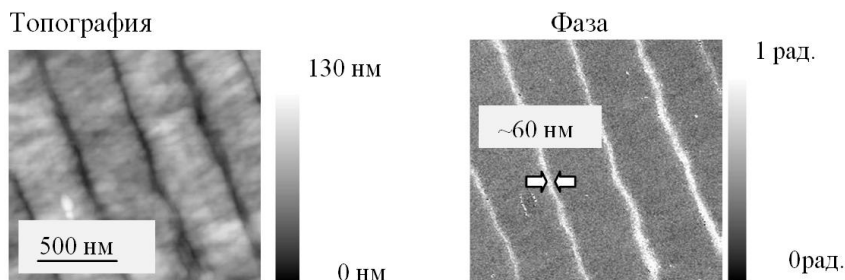


Рис. 1. IR-SNOM изображения топографии и фазы полиамида в полиэтилене с пространственным разрешением 60 нм

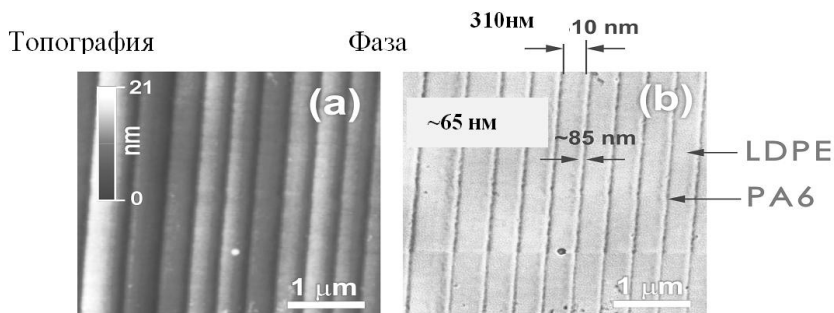


Рис. 2. TERS-изображение топографии (а) и фазы (б) тонких слоев полиамида в полиэтилене с пространственным разрешением 65 нм

Таким образом, TERS и IR-SNOM спектроскопия являются взаимно дополняющими методами, которые позволяют получать ключевую информацию о структуре молекул с субволновым пространственным разрешением.

#### Список литературы

1. Hoffmann G.G., Xue L., Loos J. High-resolution tip-enhanced Raman mapping // *Macromolecular Symposia*. 2011. No.7. P.26-42.
2. Hoffmann G.G., Loos J. Micro-Raman and tip-enhanced Raman spectroscopy of carbon allotropes.// *Macromolecular Symposia*. 2008. No.5. P.1-11.
3. Prater C., Kjoller K., Shetty R. Nanoscale infrared spectroscopy // *Materials today*. 2010. No.11. P.1-13.

Е.А. ЧЕРНЫХ, С.С. ХАРИНЦЕВ, А.М. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*  
<sup>1</sup>*Назарбаев университет, Астана, Казахстан*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ МОРФОЛОГИИ КОМПОЗИТНОГО ПОЛИМЕРА PTB7:PC71BM:DIO С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОННОЙ МИКРОСКОПИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Производительность органических фотоэлектрических солнечных элементов зависит от наноразмерных структур светочувствительного слоя и архитектуры устройства в целом. Оптимизация морфологии солнечных элементов для обеспечения максимальной эффективности преобразования энергии является сложной и важной задачей на сегодняшний день. В основе одной из эффективных органических солнечных батарей лежит гетероструктура BTB7:PC71BM. При добавлении в ее состав 3% диоктана (DIO) она становится более однородной и как следствие повышается эффективность преобразования солнечной энергии. Это было ранее показано в работе [1], в которой морфология гетероструктуры изучалась с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). В нашей работе решалась аналогичная задача путем плазмонной микроскопии высокого разрешения. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами, показанными в работе [1].

Е.А. CHERNYKH, S.S. KHARINTSEV, A.M. ALEKSEEV<sup>1</sup>  
*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan*  
<sup>1</sup>*Nazarbaev University, Astana, Kazakhstan*

## **EXPERIMENTAL STUDY OF THE SURFACE MORPHOLOGY OF THE COMPOSITE POLYMER PTB7:PC71BM:DIO USING PLASMON HIGH-RESOLUTION MICROSCOPY**

The performance of organic photovoltaic solar cells depends on the nanoscale structures of the photosensitive layer and architecture of the whole device. Optimization of the morphology of the solar cells to maximize the efficiency of energy conversion is a complex and important task for today. At the heart of one of the most effective organic solar cells is heterostructure BTB7: PC71BM. When adding 3% in that composition diiodooctane (DIO), it becomes more uniform and consequently conversion efficiency of solar energy is improved. It was early shown in the article [1], in which the morphology of the heterostructure was studied using a scanning tunneling microscope

(STM). In our work we solved a similar problem by plasma high-resolution microscopy. The results correlate well with the results shown in [1].

На сегодняшний день максимальная эффективность преобразования энергии органических солнечных элементов с гетероструктурой РТВ7:РС71ВМ составляет 9,9 %, [2] и, как следствие, эта смесь представляет большой интерес. Мы провели сравнение данной гетероструктуры с (образец 1) и без (образец 2) 3% DIO. С помощью АСМ и метода зонда Кельвина были получены фазовые изображения пленок, где был показан неоднородный характер матрицы: домены, состоящие из сфер фуллерена РС71ВМ в 20-60 нм в диаметре были встроены в матрицу полимера РТВ7. На рис. 1 TERS-изображение этого же образца, на котором мы видим аналогичную матричную структуру, где темные области – это домены РС71ВМ, а светлые – полимерная матрица РТВ7. Этот результат коррелирует с предыдущим результатом. До добавления 3% DIO измерения с помощью туннельного тока и TERS продемонстрировали ячеистую структуру образца. После добавления DIO эта структура исчезает, происходит однородное перемешивание полимера и фуллерена. Сравнивая изображения, полученные с помощью сканирующей туннельной микроскопии и изображения, полученные с помощью TERS (рис. 1в) мы видим, что больше ячеистая структура не наблюдается.

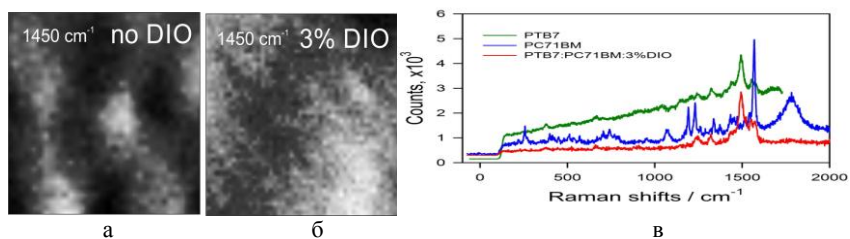


Рис. 1. TERS изображения РТВ7:РС71ВМ с DIO (а) и без (б), спектры РТВ7, РС71ВМ, РТВ7:РС71ВМ:3%DIO (в)

#### Список литературы

1. Alekseev A., Hedley G.J., Al-Afeef A., Ageev O.A., Samuel I. // Journal of Materials Chemistry A. 2015. V.3. P.8706-8714.
2. He Z., Xiao B., Liu F., Wu H., Yang Y., Xiao S., Wang C., Russell T.P., Cao Y. // Nature Photonics. 2015. V.9. P.174-179.
3. Hedley G.J., Ward D.J., Alekseev A., Howells C.T., Martins E.R., Serrano L.A., Cooke G., Ruseckas A., Samuel I.D.W. // Nature Communications. 2013. V.4. P.2867.

И.Н. ГОНЧАРУК, А.В. ИЛЬИНСКИЙ,  
И.О. ПОПОВА<sup>1</sup>, Е.Б. ШАДРИН

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*<sup>1</sup>Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,*  
*Санкт-Петербург*

## **ПРОЯВЛЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ В СПЕКТРАХ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА КРИСТАЛЛАМИ ДИОКСИДА ВАНАДИЯ**

Показано, что в кристаллах сильно коррелированного материала – диоксида ванадия – при фазовом переходе (ФП) из моноклинной фазы в тетрагональную узколинейчатый спектр комбинационного рассеяния света трансформируется в широкополосный с двумя максимумами при  $500$  и  $5000\text{ cm}^{-1}$  с ширинами  $400$  и  $3500\text{ cm}^{-1}$ . При приближении к точке структурного перехода ( $340\text{K}$ ) контур линии фонона мягкой моды с частотой  $149\text{ cm}^{-1}$  и линии фонона  $201\text{ cm}^{-1}$  приобретают форму контура Фано. Показано, что термическая трансформация максимумов находится в количественном согласии с теорией комбинационного рассеяния света в сильно коррелированных материалах. Определена энергия корреляционного взаимодействия электронов ( $3\text{ эВ}$ ).

I.N. GONCHARUK, A.V. ILINSKIY,  
I.O. POPOVA<sup>1</sup>, E.B. SHADRIN

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg*  
*<sup>1</sup>The A.I. Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg*

## **DEMONSTRATION OF CORRELATION INTERACTION OF ELECTRONS IN RAMAN SPECTRA OF VANADIUM DIOXIDE CRYSTALS**

It has been shown that, in crystals and films of a strongly correlated material, namely, vanadium dioxide, upon a phase transition from the monoclinic phase to the high-temperature tetragonal phase, the narrow-line Raman spectrum transforms into the broad-band Raman spectrum, which contains two peaks at  $500$  and  $5000\text{ cm}^{-1}$  with widths of  $400$  and  $3500\text{ cm}^{-1}$ . By approaches the structural phase transition temperature ( $340\text{ K}$ ), the line profile of soft-mode phonons at a frequency of  $149\text{ cm}^{-1}$  and the line profile of phonons at a frequency of  $201\text{ cm}^{-1}$  acquire an asymmetric Fano. It has been demonstrated that the thermal transformation of peaks in the Raman spectra is in quantitative agreement with the theory of Raman scattering in strongly correlated materials. It has been estimated the energy of correlation interaction ( $3\text{ eV}$ ).

Линейчатые спектры комбинационного рассеяния света (КРС) в изолирующей фазе  $\text{VO}_2$  исследованы подробно в [1]. В металлической фазе ( $T$  больше 340 К) линейчатый спектр КРС заменяется сплошным слабо структурированным фоном, что создает проблему интерпретации, поскольку сечение рассеяния света на свободных электронах металла исчезающе мало [2]. Поэтому неупругое рассеяние света может происходить либо в системе с электрон-электронным взаимодействием, в частности, корреляционным [2], либо в системе с локальными колебаниями примеси [3]. Задача теоретического описания КРС в сильно коррелированном материале была решена для  $\text{VO}_2$  лишь в 2001 году [4]. Согласно [4], в спектре КРС изолирующей фазы с приближением к точке ФП на частоте  $1,2U$  появляется широкий Ферми-жидкостный максимум ( $U$ -корреляционная энергия). Это определяет цель настоящей работы, состоящей в изучении трансформации спектра КРС в кристаллах  $\text{VO}_2$  вблизи  $T_c$  и в сопоставлении результатов эксперимента, с теорией [4].

Интерпретация спектров КРС, в которых имеют место три явления (термическая трансформация параметров широких максимумов, возникновение контура Фано у низкочастотных линий спектра КРС и смягчение частоты моды  $149 \text{ cm}^{-1}$ ), может быть выполнена следующим образом. Вблизи критической температуры  $T_c$  структурного ФП в спектрах КРС  $\text{VO}_2$  наблюдается широкий максимум, обусловленный континуумом сильно коррелированных электронов. Он зарождается в изолирующей фазе моноклинной симметрии, а его интенсивность растет с ростом температуры по мере уменьшения ширины моттовской щели. Температурная трансформация экспериментально измеренного спектра КРС хорошо описывается теорией КРС сильно коррелированных материалов [4]. Величина мотт-хатбардовской энергии электрон-электронного взаимодействия в  $\text{VO}_2$  оценена в 3 eV. Наличие антирезонанса Фано свидетельствует о типичном Ферми-жидкостном поведении континуума сильно коррелированных. При приближении к  $T_c$  узкие линии спектра КРС  $\text{VO}_2$  не исчезают, как полагали ранее [1], но имеет место лишь перекачка их спектрального веса в пользу широкого Ферми-жидкостного максимума, что находится в соответствии с LA DMFT-теорией [4].

#### *Список литературы*

1. Pan M., Liu J., Zhong H., et al // J. Cryst. Growth. 2004. V.268. P.178.
2. Opel M., Nemetschek R., Hoffmann C., et al. // Phys. Rev. B. 2000. V.61. P.9752.
3. Trallero-Giner C., Cantarero A., Cardona M., Mora M. // Phys. Rev. B. 1992. V.45. P.6601.
4. Freericks J.K., Devereaux T.P., Bulla R. // Phys. Rev. B. 2001. V.64. P.114.
5. Fano U. // Phys. Rev. 1961. V.124. P.1866.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Н.В. ТРЕГУБ,  
Е.А. СЕЛЕЗНЕВА, А.А. АСАДОВА

*Самарский государственный аэрокосмический университет  
им. акад. С.П. Королева*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

В работе представлены результаты исследования воздействия тяжелых металлов (ТМ) на растительные биоиндикаторы с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. В качестве объектов исследований использовались листья водных и почвенных растений. Исследуемыми зонами являлись городские акватории, а также прилегающая территория крупного авиационного завода. Погрешность метода спектроскопии комбинационного рассеяния не превышала 4,7%. В результате проведенной работы введены критерии, отражающие влияние тяжелых металлов на оптические характеристики растений. На основе полученных данных проведен мониторинг акваторий Самарской области и прилегающей территории авиационного завода на наличие тяжелых металлов с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Результаты исследований подтверждены химическим анализом.

E.V. TIMCHENKO, P.E. TIMCHENKO, N.V. TREGUB,  
E.A. SELEZNEVA, A.A. ASADOVA

*Samara State Aerospace University*

## **INVESTIGATION OF ENVIRONMENTAL POLLUTION BY HEAVY METALS BY RAMAN SPECTROSCOPY**

The results of research on the effects of heavy metals (HM) on plant bio-indicators by using the method of Raman spectroscopy. As the object of the investigation leaves water and soil plants. The investigated area is the urban water area and the surrounding area of a large aircraft factory. Accuracy of the method Raman spectroscopy does not exceed 4.7%. As a result of the work introduced shows the influence of the effect of heavy metals on the optical characteristics of plants. Based on these results were monitored water areas of the Samara region and the surrounding area of aviation factory on the presence of heavy metals by using the method of Raman spectroscopy. The results of research are confirmed by chemical analysis.

В настоящее время интенсивность загрязнения окружающей среды, в том числе тяжелыми металлами (ТМ), возрастает с каждым годом. Основными источниками загрязнений тяжелыми металлами являются предприятия авто- и авиастроения. Среди тяжелых металлов, наиболее распространенными загрязнителями промышленного происхождения являются медь (Cu) и марганец (Mn). Выбросы промышленного происхождения носят циклический характер и их интегрированное влияние на живые системы сложно оценить в связи с непостоянством метеоусловий, направления и силы ветров. Данную проблему удалось решить, используя в качестве локальных интегральных индикаторов растительные биообъекты.

В качестве объектов исследований использовались листья водных (*Ceratophyllum demersum* L) и почвенных (*Tagáxasum*) растений. Исследуемыми зонами являлись городские акватории, а также прилегающая территория крупного авиационного завода. Погрешность метода спектроскопии комбинационного рассеяния не превышала 4,7%.

Было исследовано более 470 объектов. Объекты отбирались в одно и тоже время с 7 акваторий города, а также с прилегающей территории крупного авиационного завода, территория которого была условно разделена на 21 исследуемую зону. Был проведен химический анализ исследуемых зон на наличие марганца и меди.

В результате проведенной работы введены критерии, отражающие влияние тяжелых металлов на оптические характеристики растений. Проведен двумерный анализ оптических коэффициентов, позволяющий ранжировать исследуемые территории по уровню загрязненности тяжелыми металлами. На основе полученных данных проведен мониторинг акваторий Самарской области и прилегающей территории авиационного завода на наличие марганца и меди с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния. Результаты исследований подтверждены химическим анализом.



А.В. ЕГОРЫШЕВА<sup>1</sup>, Т.Д. ДУДКИНА, О.М. ГАЙТКО<sup>1</sup>,  
П.О. РУДНЕВ<sup>1</sup>

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Институт общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова РАН,*

## **СИНТЕЗ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ СЛОЖНОГО ОКСИДА ВИСМУТА**

Изучено взаимодействие кислотных растворов висмута, железа и сурьмы с моноэтаноламином и аммиаком, и определено влияние условий соосаждения на фазовый состав и морфологию продуктов реакции. Впервые получены образцы нанокристаллического Bi-Fe-Sb-O пирохлора. Продемонстрирована фотокаталитическая активность синтезированных порошков пирохлора, превышающая в видимом диапазоне спектра характеристики TiO<sub>2</sub> Degussa P25.

A.V. EGORYSHEVA<sup>1</sup>, T.D. DUDKINA, O.M. GAITKO<sup>1</sup>,  
P.O. RUDNEV<sup>1</sup>

*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow*

## **SYNTHESIS OF VISIBLE LIGHT PHOTOCATALYST BASED ON COMPLEX BISMUTH OXIDE**

The interaction of acidic solutions of bismuth, iron, and antimony with monoethanolamine and ammonia was studied, and the effect of the coprecipitation conditions on the phase composition and morphology of the reaction products was determined. Samples of nanocrystalline pyrochlore containing bismuth, iron, and antimony were produced for the first time. The excess of photocatalytic activity of synthesized of powders pyrochlore in the visible spectrum characteristics of TiO<sub>2</sub> Degussa P25 was demonstrated.

Благодаря простоте и экономичности вследствие использования энергии солнечного света фотокаталитические технологии очистки воды и воздуха находят широкое практическое применение. Среди полупроводниковых фотокатализаторов наиболее используемым на сегодняшний день является диоксид титана. Однако, из-за большой ширины запрещенной зоны, для его активации требуется УФ излучение, которое составляет всего 5% солнечного спектра. Поэтому широко ведется поиск новых фотокатализаторов, работающих в видимом диапазоне. В ряде работ сообщалось о высокой фотоактивности сложных оксидов висмута со структурой типа пирохлоров, однако исследования в

них проводили на измельченных образцах, синтезированных традиционным методом твердофазной реакции. Метод соосаждения с последующим отжигом позволяет получать высокодисперсные образцы с большей удельной поверхностью, что обеспечивает повышенную эффективность работы фотокатализатора. Ранее [1] нами было показано существование в системе  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_5$  обширной области твердых растворов со структурой типа пирохлора. Край поглощения  $\text{Bi-Fe-Sb-O}$  пирохлора лежит в области 2 эВ, что указывает на перспективность исследования его фотокаталитической активности.

Целью настоящей работы была разработка методики синтеза нанокристаллических порошков  $\text{Bi-Fe-Sb-O}$  пирохлора. Для синтеза был выбран метод соосаждения с последующим отжигом. Оптимизация условий позволила получить частицы размером 10-30 нм при температуре  $550^\circ\text{C}$ , что на  $450^\circ\text{C}$  меньше, чем температура твердофазного синтеза.

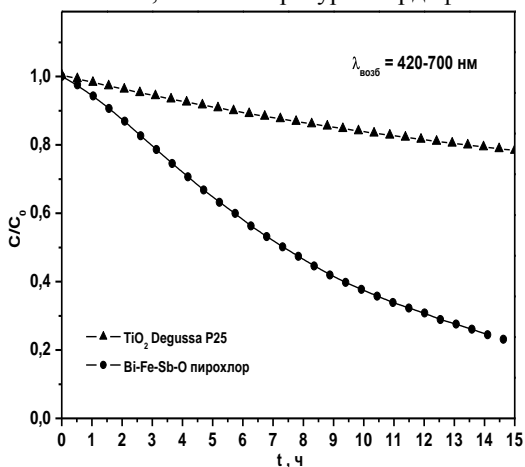


Рис. 1. Временная зависимость разложения кристаллического фиолетового

С помощью модельной реакции разложения фиолетового кристаллического продемонстрирована фотокаталитическая активность синтезированных порошков пирохлора, превышающая в видимом диапазоне спектра характеристики  $\text{TiO}_2$  Degussa P25 (рис. 1).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-03-00262).

#### Список литературы

1. Egorysheva A.V., Ellert O.G., Maksimov Yu.V. et. al. // J. Alloys Comp. 2013. V.579. P.311.

Д.С. ФАРРАХОВА<sup>1</sup>, Ю.О. КУЗНЕЦОВА<sup>1</sup>, В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

<sup>2</sup>*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

## **ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННАЯ ФЛЮОРЕСЦЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА РАННЕЙ СТАДИИ КАРИЕСА С ПРИМЕНЕНИЕМ НАНОЧАСТИЦ ФТАЛОЦИАНИНА АЛЮМИНИЯ**

В данной статье рассмотрена возможность применения лазерно-спектроскопического метода для определения локализаций микротрещин эмали с использованием наночастиц фталоцианина алюминия в качестве маркера. Были получены спектры аутофлуоресценции здоровой области и с микроповреждениями на поверхности эмали, а также спектры флуоресценции наночастиц фталоцианина алюминия, смешанные с порошком эмали зуба.

D.S. FARRAKHOVA<sup>1</sup>, Ju.O. KUZNETSOVA<sup>1</sup>, V.B. LOSHENOV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>*Prokhorov general physics institute of the RAS, Moscow*

## **DIAGNOSIS OF EARLY TOOTH CARIES WITH THE USE OF ALUMINUM PHTHALOCYANINE NANOPARTICLES BY LASER-INDUCED FLUORESCENCE**

The possibility of laser-spectroscopic method for determination of microcracks' localization of enamel with the use of nanoparticles of aluminum phthalocyanine as a marker is introduced in this article. The spectrum of autofluorescence of sound enamel, enamel with microcracks and spectrum of fluorescence of nanoparticles of aluminum phthalocyanine conjugated with powder of enamel were taken.

Микротрещины на поверхности эмали, вызванные механическими воздействиями или деминерализацией зубов со временем могут привести к кариозным повреждениям и даже разрушению и потери зубов.

Поскольку в микроповреждениях скапливается патологическая микрофлора, были исследованы и сопоставлены спектры аутофлуоресценции от здоровой эмали и содержащей микротрещины зуба, удаленного по клиническим показаниям. Интенсивности флуоресценции практически равны, как и в исследованиях С.Ю. Васильченко и его коллег [1].

Для дальнейшего исследования была смешана растертая в порошок эмаль с наночастицами фталоцианина алюминия, для некоторых измерений были добавлены слюна и дистиллированная вода, для приближения среды микрофлоры в полости рта. Спектры были получены на длине волны возбуждения 632,8 нм, с помощью установки на основе лазерного электронного спектроанализатора «LESA-01-Biospec» (рис. 1).

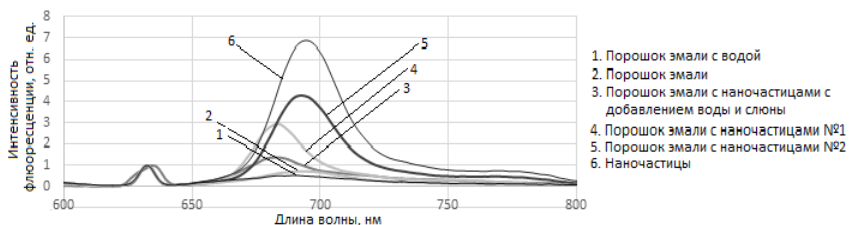


Рис. 1. Спектры флуоресценции эмали с наночастицами фталоцианина алюминия на длине волны возбуждения 632,8 нм.

Интенсивность флуоресценции наночастиц фталоцианина алюминия значительно выше, чем интенсивность флуоресценции здоровой эмали и порошка эмали.

Данный эксперимент показывает, что наночастицы могут служить в качестве маркера, застревая в микроповреждениях эмали, для точного обнаружения их нахождения, а также для заживления поверхности зуба. Подобный метод позволит предотвратить дальнейшее повреждение зуба и проводить профилактику различных патологических процессов.

#### *Список литературы*

1. Васильченко С.Ю., Волкова А.И., Лошенов В.Б., Синяева М.Л., Мамедов А.А., Лукьянец Е.А., Кузьмин С.Г. Исследование флуоресцентных свойств наночастиц фталоцианина алюминия в микроповреждениях эмали зуба // Российский биотерапевтический журнал. 2006. Т.5. №2. С.78-79.

А.С. ШАРОВА<sup>1</sup>, Ю.С. МАКЛЫГИНА<sup>2</sup>, В.Б. ЛОЩЕНОВ<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **БАКТЕРИОХЛОРИН В РОЛИ ИК-ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И ТЕРАПИИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ ОПУХОЛЕЙ МОЗГА**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных свойств бактериохлорина в фантоме мягкой ткани головного мозга. Приведено описание экспериментальной установки, также представлен анализ спектров поглощения и флуоресценции раствора бактериохлорина. Отмечены перспективы использования бактериохлорина в качестве ИК-фотосенсибилизатора.

A.S. SHAROVA<sup>1</sup>, Ju.S. MACLYGINA<sup>2</sup>, V.B. LOSHENOV<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **BACTERIOCHLORIN AS AN INFRARED PHOTOSENSITIZER FOR DEEP-LYING BRAIN TUMOR DIAGNOSTICS AND THERAPY**

The spectral properties of bacteriochlorin in the soft brain tissue phantom were experimentally investigated in this study. The description of the experimental setup, absorption and fluorescence spectra analysis of bacteriochlorin solution were specified. The benefits of bacteriochlorin as a NIR-photosensitizer were noted, as well.

В настоящее время наиболее эффективными методами выявления и борьбы с онкологическими заболеваниями являются флуоресцентная диагностика (ФД) и фотодинамическая терапия (ФДТ). Эти методы основаны на воздействии лазерного излучения на светочувствительное вещество (фотосенсибилизатор) [1]. В последние годы ведется направленный поиск новых фотосенсибилизаторов с улучшенными свойствами: наличием интенсивной полосы поглощения в дальней красной и ближней инфракрасной областях спектра [2].

Целью настоящего исследования является изучение спектроскопических свойств раствора ИК-фотосенсибилизатора бактериохлорина *in vitro*, с перспективой дальнейшего его использования

в качестве ИК-фотосенсибилизатора для диагностики и терапии глубокозалегающих опухолей мозга. Были изучены оптические свойства мозговой ткани и создан аналог (фантом) биоткани, что позволило изучать свойства фотосенсибилизатора в сложной оптической среде.

При помощи волоконно-оптического спектроанализатора ЛЭСА-01-БИОСПЕК сняты спектры собственной флуоресценции фантома мягкой ткани головного мозга и флуоресценции фантома с раствором бактериохлорина при возбуждении лазерными источниками с длинами волн:  $\lambda = 405$  нм; 532 нм, выбранные в соответствии с максимумами спектра поглощения препарата (рис. 1).

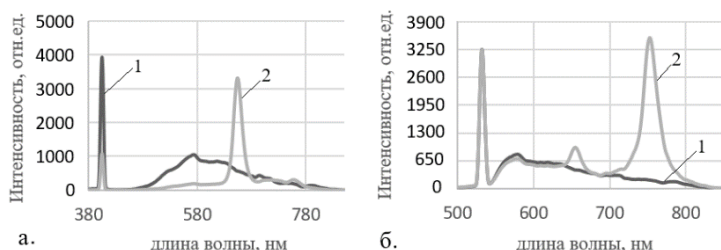


Рис. 1. Спектр флуоресценции фантома мягкой мозговой ткани (1), фантома с раствором бактериохлорина (2) при возбуждении лазерным излучением с длиной волны а)  $\lambda = 405$  нм; б)  $\lambda = 532$  нм

В ходе исследования был получен спектр флуоресценции бактериохлорина с выраженным максимумом на длине волны 752 нм, что относится к ближней ИК-области спектра. Ввиду минимального собственного поглощения биоткани в этом диапазоне спектра, можно говорить о перспективности использования исследуемого препарата в качестве ИК-фотосенсибилизатора для повышения глубины фотодинамического воздействия (до 2 см). Таким образом, применение бактериохлорина позволит анализировать более глубокие слои биоткани, что очень важно при диагностике и терапии опухолей мозга с глубокой локализацией.

#### Список литературы

1. Loschenov V.B., Konov V.I., Prokhorov A.M. Photodynamic therapy and fluorescence diagnostics // *Laser Physics*. 2000. Т.10. №6. P.1188–1207.
2. Маклыгина Ю.С., Бородин А.В., Лощенов В.Б. Лазерный микроскоп-спектроанализатор для исследования внутриклеточного накопления фотосенсибилизаторов ближнего инфракрасного диапазона спектра *in vitro* (в печати).

Е.Б. ШАДРИН, А.В. ИЛЬИНСКИЙ,  
В.М. КАПРАЛОВА<sup>1</sup>, В.О. САМОЙЛОВ<sup>2</sup>

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*  
*<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*  
*<sup>2</sup>Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург*

## МАГНИТООПТИКА ИОНОВ Fe<sup>2+</sup> В ГЕМОГЛОБИНЕ

Обнаружен поворот во внешнем магнитного поле плоскости поляризации света, рассеянного под углом 180° взвесью эритроцитов. Определены постоянная Верде (3-4)·10<sup>4</sup> мин·Тл<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup> и коэрцитивная сила 0,03 Тл. Результаты интерпретированы в рамках модели, согласно которой магнитные свойства гемоглобина обусловлены магнитным моментом гема, содержащим двухвалентный ион железа в центре порфиринового кольца.

E.B. SHADRIN, A.V. ILINSKII,  
V.M. KAPRALOVA<sup>1</sup>, V.O. SAMOILOV<sup>2</sup>

*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg*  
*<sup>1</sup>Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University*  
*<sup>2</sup>Pavlov Institute of Physiology of the RAS, Saint Petersburg*

## MAGNETO-OPTICS OF Fe<sup>2+</sup> IONS IN HEMOGLOBIN

Turn in external magnetic a field of a plane of polarization of light scattered at an angle nearby by 180° suspension erythrocytes is found out. Are defined constant Verde and coercitive force. Results are interpreted on the basis of model according to which magnetic properties of hemoglobin are caused by the magnetic moment heme, containing a bivalent ion of iron in the centre porphirine rings.

Работа посвящена изучению магнитных свойств взвеси эритроцитов, которые имеют форму двояковогнутого диска диаметром 7,5 мкм и толщиной на периферии 2,5 мкм (в центре – 1,5 мкм). Эритроциты обладают собственным магнитным моментом, что способствует их самоорганизации в сверхструктуры в виде “монетных столбиков”, обладающих значительным макроскопическим магнитным моментом [1-3]. Взвесь эритроцитов устанавливалась между полюсами электромагнита, через отверстие в одном из полюсов которого проходил линейно поляризованный лазерный луч. Он полностью рассеивался взвесью по всем направлениям. Свет, рассеянный в обратном направлении под малым (около 0,5°) углом, призмой Волластона разделялся на два луча с взаимно ортогональными линейными поляризациями и воспринимался

фотоприемниками. Такая конструкция представляла собой оптический мост, позволявший добиваться высокой точности угловых измерений. Минимально регистрируемое значение угла поворота плоскости поляризации составляло  $10^{-5}$  рад. Величина магнитного поля варьировалась в диапазоне от 0 до 0,84 Тл.

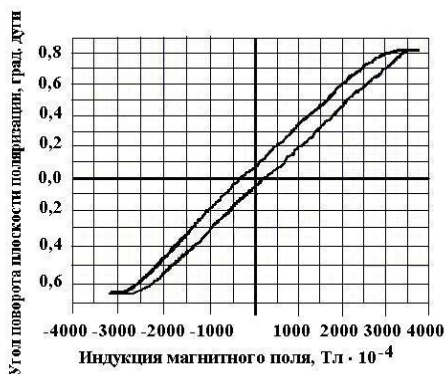


Рис. 1. Зависимость угла поворота плоскости поляризации света от индукции магнитного поля для взвеси эритроцитов

Из приведенных измерений следует, что поворот плоскости поляризации оказывается линейно зависящим от магнитного поля ( $\Delta\phi = VBL$ ). При этом изменение знака магнитного поля меняет знак угла поворота плоскости поляризации на обратный (нечетный магнитооптический эффект) и, кроме того, имеется остаточная намагнитченность (гистерезис). Считая [4], что коэффициент поглощения лазерного излучения ( $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ) составляет величину  $\approx 6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ , можно оценить глубину  $L$  проникновения света в толщу вещества эритроцита: 1-1,2 мкм, что из соотношения  $\Delta\phi = VBL$  позволяет оценить постоянную Верде:  $V = (3-4) \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{Тл}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ . Величина коэрцитивной силы  $\approx 0,03 \text{ Тл}$ .

#### Список литературы

1. Блюменфельд Л.А. // Соросовский образовательный журнал. 1998. №4. С.33-38.
2. Higashi T, Yamagishi A, Takeuchi T, Kawaguchi N, Sagawa S, Onishi S, Date M. // Journal «Blood». 1993. V.82. No.4. P.1328-1334.
3. Kramer I, Vienken K, Vienken J, Zimmermann U // Biochim Biophys Acta. 1984. V.772(3). P.407-10.
4. Sem'yanov K.A., Tarasov P.A., Soini J.T., Petrov A.K., Maltsev V.P. // Applied Optics. 2010. V.39. No.31. P.5884- 5889.



Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>,  
А.Ю. РОЗЕНБАУМ, А.Ю. КУЛАБУХОВА

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева*

<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **АНАЛИЗ ТКАНЕЙ ЗУБОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований здоровых тканей зуба и тканей зуба при заболевании кариес. В качестве объектов исследования были использованы 11 образцов больших и малых коренных зубов пациентов с диагнозом «Кариес» (K02). Погрешность метода спектроскопии комбинационного рассеяния не превышала 3%. В ходе работы были получены особенности спектра комбинационного рассеяния для тканей зуба при заболевании кариес: основные изменения зарегистрированы на волновых числах  $956\text{ см}^{-1}$ ,  $1069\text{ см}^{-1}$ , соответствующих фосфату и  $1241\text{ см}^{-1}$ ,  $1660\text{ см}^{-1}$ , соответствующих коллагену III и коллагену I соответственно. Введены критерии позволяющие детектировать кариес и выявлять ослабление тканей зубов, предшествующее кариесу.

E. V. TIMCHENKO, P. E. TIMCHENKO, L. T. VOLOVA<sup>1</sup>,  
A. Yu. ROSENBAUM, A. Yu. KULABUHOVA

*Samara State Aerospace University*

<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **TISSUE ANALYSIS TEETH BY RAMAN SPECTROSCOPY**

The results of experimental studies of healthy tooth tissue and tooth decay with the disease. As a follow-IP objects were used 11 samples of large and small molars of patients with a diagnosis of "caries" (K02). Accuracy of the method of Raman spectroscopy does not exceed 3%. The work was produced especially for the Raman spectrum of dental tissues during tooth decay: the major changes recorded in the wave numbers  $956\text{ cm}^{-1}$ ,  $1069\text{ cm}^{-1}$ , corresponding phosphates and  $1241\text{ cm}^{-1}$ ,  $1660\text{ cm}^{-1}$ , corresponding to collagen III and collagen I respectively. Introduced criteria allowing to detect tooth decay and weakening of tooth tissue to identify, prior to caries.

В стоматологии, как и в любой другой отрасли медицины, успешное и эффективное лечение начинается с качественной диагностики зубов. Одной из самых распространенных стоматологических заболеваний является кариес. В тоже время известно, что первые признаки кариеса, которые ведут к ослаблению ткани зубов и могут предотвратить его

развитие, очень трудно диагностировать. Последствия развития кариеса могут привести к развитию фиброзного пульпита, а в итоге и к удалению зуба, что приводит к эстетической проблеме пациента. В настоящее время широкое применение для оценки зубов используются оптические методы исследований, которые являются неdestructивными. Среди них широкое распространение получил метод спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), который является простым и не требует подготовки образца. В качестве объектов исследования были использованы 11 образцов больших и малых коренных зубов пациентов с диагнозом «Кариес» (K02). Спектральные характеристики образцов изучались с помощью экспериментального стенда, включающего в себя высокоразрешающий цифровой спектрометр Shamrock sr-303i с встроенной охлаждаемой камерой DV420A-OE, волоконно-оптический зонд для спектроскопии комбинационного рассеяния RPB785, совмещённый с лазерным модулем LuxxMaster LML-785.0RB-04.

В результате проделанной работы, получены особенности спектров комбинационного рассеяния для здоровых тканей зуба и тканей зуба при заболевании кариес. Установлено, что кариес характеризуется изменением спектра на волновых числах  $956\text{ см}^{-1}$ ,  $1069\text{ см}^{-1}$ , соответствующих фосфату и  $1241\text{ см}^{-1}$ ,  $1660\text{ см}^{-1}$ , соответствующих коллагену III и коллагену I соответственно.

Для диагностики процесса развития кариеса и ослабления твёрдых тканей зуба (эмаль, дентин, цемент, пульпа) были введены следующие коэффициенты и построены двухмерные зависимости: D – коэффициент, пропорциональный изменению содержания карбонат-ионов кальция в ткани зуба (замещение ионов  $(\text{PO}_4)^{3-}$  на  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , В типа); K – коэффициент, характеризующий замещение коллагена I на коллаген III.

Установлено, что кариес характеризуется уменьшением оптических коэффициентов, что обусловлено уменьшением ионов  $(\text{PO}_4)^{3-}$  и коллагена I- в ткани зуба. Также выявлено, что для эмали и цемента характерно наибольшее соотношение замещения  $(\text{PO}_4)^{3-}$  на  $(\text{CO}_3)^{2-}$  (замещение В-типа) относительно замещения коллагена I на коллаген III типа. При патологических процессах, таких как кариес, изменения в спектре, прежде всего, связаны как с реминерализацией твёрдых тканей зуба, так и с изменениями структуры минеральной компоненты за счёт замещения более устойчивых компонент менее устойчивыми.

Достоверность результатов исследований подтверждена растровой электронной микроскопией.

Е.В. ТИМЧЕНКО, П.Е. ТИМЧЕНКО, Л.Т. ВОЛОВА<sup>1</sup>,  
П.Ю. ШАЛКОВСКАЯ, С.В. ПЕРШУТКИНА

*Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева*  
<sup>1</sup>*Самарский государственный медицинский университет*

## **ОЦЕНКА БИОТКАНЕВЫХ ИМПЛАНТАТОВ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ**

Представлены результаты экспериментальных исследований биотканевых имплантатов с помощью спектроскопии КР. Для выделения интересующей линии, полученные спектры КР после полиномиальной аппроксимации, разбивались на спектральные контуры с помощью программы «MagicPlotPro». Установлены спектральные особенности биоматрикс, изготовленные по различным протоколам. Основные различия проявляются на волновых числах 1062 см<sup>-1</sup>, 1650 см<sup>-1</sup>, 851 см<sup>-1</sup>, 814 см<sup>-1</sup>. Введены оптические критерии и проведен двумерный анализ, позволяющий выявлять оптимальный протокол изготовления биотканевых имплантатов.

E. V. TIMCHENKO, P. E. TIMCHENKO, L. T. VOLOVA<sup>1</sup>,  
P. Yu. SHALKOVSKAYA, S. V. PERSHUTKINA

*Samara State Aerospace University*  
<sup>1</sup>*Samara State Medical University*

## **ASSESSMENT OF BIOTISSUE IMPLANTS RAMAN SPECTROSKOPY**

Presents the results experimental studies of biotissue implants using Raman spectroscopy (RS). To highlight lines of interest received after the Raman spectra of polynomial approximation, crashed on the spectral contours using the program «MagicPlotPro». Established spectral features biomatrix made by different protocols. Major differences appear at wavenumbers 1062 cm<sup>-1</sup>, 1650 cm<sup>-1</sup>, 851 cm<sup>-1</sup>, 814 cm<sup>-1</sup>. Introduced optical criteria and conducted bivariate analysis, which allows to identify the optimal protocol fabrication biotissue implants.

Биоматериалы играют решающую роль в трансплантационной терапии: поддерживают форму и структуру тканей, обеспечивают механическую стабильность и восстановление целостности их функций [1]. При их внедрении в организм пациента процесс может быть сопряжен с возникновением нежелательных эффектов: нарушение гомеостаза, возможностью отторжения имплантата, плохой его интеграцией. Это связано с тем, что использование донорских биоматрикс

ограничивается их иммуногенными свойствами, вызванных клетками эпидермиса в ткани. Поэтому при изготовлении имплантатов ткани подвергают обработке методом децеллюляризации. Данный процесс может сопровождаться уменьшением содержания гликозаминогликанов (ГАГ) и протеинов по сравнению с нативными образцами, которые являются частью межклеточного вещества биоматрикса, что может привести к ухудшению интеграции. Поэтому, комплексная оценка процесса обработки имплантатов является весьма актуальной задачей.

В качестве основного метода контроля имплантатов был использован метод спектроскопии комбинационного рассеяния [2]. В результате проведенных тестовых экспериментов была выбрана мощность лазерного излучения 100 мВт, которая в пределах используемых времён экспозиции до 50 секунд не вызывает деструктивных изменений образцов. Погрешность метода спектроскопии комбинационного рассеяния составила 3%. Обработка спектров осуществлялась в программе WolframMathematica 8. Для подавления фона флуоресценции и выделения КР спектров был использован метод полиномиальной аппроксимации. Для выделения интересующей линии, полученные спектры КР после полиномиальной аппроксимации, разбивались на спектральные контуры с помощью программы «MagicPlotPro», где была использована декомпозиция функций Гаусса и Лоренца.

Объектами исследований являлись нелиофилизированные образцы аорты, мочевого пузыря и лиофилизированной кожи человека, изготовленные по различным протоколам с использованием технологий децеллюляризации университета Генриха-Гейне (Германия) [3] и «Лиопласт» (ТУ-9398-001-01963143-2004). В результате проведенных исследований получены особенности спектра КР для биотканевых имплантатов разных типов, изготовленных по различным протоколам. Установлено, что основные различия проявляются на волновых числах  $1062\text{ см}^{-1}$ ,  $1650\text{ см}^{-1}$ ,  $851\text{ см}^{-1}$  и  $814\text{ см}^{-1}$ , соответствующих гликозаминогликанам, амиду I, пролину, а также фосфодиэфиру РНК соответственно. Введены оптические критерии и проведен двумерный анализ, позволяющий выявлять оптимальный протокол изготовления биотканевых имплантатов. Результаты исследований подтверждены морфологическим анализом.

#### *Список литературы*

1. Davis H.E., Leach J.K. Hybrid and composite biomaterials in tissue engineering // Topics in Multifunctional Biomaterials and Devices. 2008. №10. С.1–26.
2. Тимченко Е.В., Тимченко П.Е. и др. // Квант. Электроника. 2014. №44(7). С.696–699.
3. Lichtenberg A., Tudorache I., Cebotari S., et. al. // Biomaterials. 2006. №27. P.4221–4229.

И.А. МЯСОЕДОВА, В.В. САЛМИН, А.Б. САЛМИНА  
*Красноярский государственный медицинский университет  
им. В.Ф. Войно-Ясенецкого*

## **ГОЛОГРАФИЯ И СИНТЕЗ МИКРОСТРУКТУР БИОПОЛИМЕРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ БИМЕДИЦИНСКИХ И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

Исследования посвящены актуальной проблеме разработке технологий изготовления клеточных матриц – скаффолдов – для различных биотехнологических и медицинских задач. Нами рассмотрены методы записи управляемого спекл-поля в желатиновой матрице с последующим формированием микропустот для создания клеточных матриц с заданными свойствами.

I.A. MYASOEDOVA, V.V. SALMIN, A.B. SALMINA  
*Krasnoyarsk State Medical University named after Prof. V.F. Voino-Yasenetsky*

## **HOLOGRAPHY AND SYNTHESIS OF POLYMER MICROSTRUCTURES TO MEET THE CHALLENGES OF BIOMEDICINE AND BIOTECHNOLOGY**

The focus of this study is the development of new technologies for producing cell matrices – scaffolds – for various biotechnological and medical purposes. We have analyzed the methods of the governed speckle pattern recordings in the gelatin matrix followed by the formation of microholes for further development of cell matrices with the desired properties

Создание и внедрение биоматериалов, способных замещать или восстанавливать дефекты биологических тканей, является одной из актуальных проблем биомедицинских и клинических исследований. Это достигается выращиванием клеток, помещенных на клеточные матрицы - скаффолды. Функциональное назначение скаффолдов заключается в обеспечении фиксации клеток, создании оптимальных условий для их роста и дифференцировки. Скаффолды могут быть использованы в различных клеточных тест-системах, в том числе для тестирования фармакологических препаратов, а также в биотехнологических клеточных системах. В настоящее время скаффолды изготавливают различными методами, например, такими, как фазовая сепарация, двухфотонная полимеризация, 3D-печать и др.

Целью работы является разработка методики создания скаффолдов с управляемой структурой с помощью методов спекл-интерферометрии и голографии.

Предлагаемая в данной работе голографическая технология изготовления скаффолдов заключается в формировании нерегулярной интерференционной картины (спекл-структуры), которая образуется при прохождении когерентного лазерного луча сквозь рассеиватель. Для записи спеклового поля используется излучение 2-ой гармоники Nd:YAG лазера с длиной волны излучения 533 нм. В качестве биосовместимого материала для изготовления скаффолда применяется желатин. Запись спекл-поля производится на фотопленку ПФГ, ПФГ-01, с последующей обработкой, формирующей микропористую структуру. Контроль структуры созданного скаффолда осуществляется с помощью оптического конфокального и электронного растрового микроскопов, а также с помощью методов светорассеяния.

Нами исследованы режимы в проходящем поле, формирующем 2-х мерную квазирегулярную структуру, и во встречных пучках, формирующих регулярную 3х-мерную структуру. Проанализировано влияние режимов обработки желатиновых пленок на характеристики микроструктуры и плотности скаффолдов. Полученные скаффолды протестированы в технологии выращивания клеток в модели гематоэнцефалического барьера.

Таким образом, голографическая технология с формированием спекл-структуры является эффективным методом решения биотехнологических задач, так как позволяет сопоставлять размеры спеклов и клеток биологической ткани, которая будет выращиваться на данном скаффолде.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-25-00054).

#### *Список литературы*

1. Bertoni F., Barbani N., Giusti P., Ciardelli G. Transglutaminase reactivity with gelatine: perspective applications in tissue engineering // *Biotechnol Lett.* 2006. V.28. P.697–702.
2. Ovsianikov A., Deiwick A., Van Vlierberghe S., Dubrue P., Moller L., Drager G., Chichkov B. Laser fabrication of three-dimensional CAD scaffolds from photosensitive gelatin for applications in tissue engineering // *Biomacromolecules.* 2011. V.12. P.851–858.

Д.С. ДУДОВА<sup>1,2</sup>, Н.В. МИНАЕВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Троицк

## **СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР ИЗ БИОСОВМЕСТИМЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАН-ХИТИНА МЕТОДОМ 3D ПЕЧАТИ**

Представлена разработанная технология создания трехмерных матриц из биосовместимых материалов методом лазерной стереолитографии с использованием излучения в УФ диапазоне. Представлены экспериментальные результаты по лазерной полимеризации биосовместимых материалов на основе композиций хитозан-хитин с различным составом.

D.S. DUDOVA<sup>1,2</sup>, N.V. MINAEV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Institute on Laser and Information Technologies of the RAN, Troitsk

## **THE CREATION OF THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES FROM BIOCOMPATIBLE COMPOSITIONS BASED ON CHITOSAN-CHITIN USING 3D PRINTING**

Presents the technology of creating a three-dimensional matrix of biocompatible materials by laser stereolithography with the use of radiation in the UV range. Experimental results are presented on laser polymerization of biocompatible materials based on different compositions of chitosan-chitin.

Экспериментальное развитие печати органов началось в конце 20 века [1]. Первые эксперименты в данном направлении показали возможность создания фрагментов различных тканей и органов. Определяющим этапом в развитии технологии восстановления органов стала возможность создавать биосовместимые пористые матрицы (скаффолды) по заданной трехмерной модели с заданными параметрами структуры на микроуровне. На современном этапе большие надежды связывают со скаффолд-технологиями [2]. Скаффолды представляют собой трехмерные пористые или волокнистые матрицы, одна из основных функций которых состоит в обеспечении механического каркаса для клеток. Скаффолды должны обладать следующими свойствами: биосовместимость, отсутствие иммунологического отторжения, нетоксичность, биодеградация и другими.

Одним из методов создания трехмерных матриц является фемтосекундная микростереолитография [3]. В нашей лаборатории была получена перспективная композиция на основе хитозан-хитин, на которой методом двухфотонной фемтосекундной микростереолитографии были получены трехмерные матрицы, пригодные для использования в качестве нейроимплантов [3]. Достоинством этого метода является возможность создания структур с высоким разрешением, но при этом производительность метода низкая. В связи с этим было предложено создать установку для высокоскоростной печати скаффолдов на основе выше названных композиций и УФ лазера.

В ходе нашей работы был создан 3D принтер стереолитографического типа для создания трехмерных структур с необходимыми параметрами по заданной 3D модели. Жидкий полимер заливался в кварцевую ванну, через дно которой подводилось лазерное излучение. В качестве источника излучения использовался импульсный ультрафиолетовый лазер (длина волны 263 нм, частота 1-4 кГц, мощностью 40 мВт). Излучение фокусировалось различными объективами в пятна диаметром от 50 мкм и более. Для перемещения лазерного излучения использовалась сканирующая головка или моторизированная трехмерная трансляционная система, что позволяло создавать сложные структуры.

С помощью разработанной установки были проведены эксперименты по полимеризации и получению объемных скаффолдов на ряде материалов на основе хитозан-хитин с различным составом и фотоинициаторами.

#### *Список литературы*

1. Миронов В.А. Вслед за создателем. Технологии биопринтинга // НАУКА из первых рук. 2013. №4(52).
2. Knight E., Murray B., Carnachan R., Przyborski S. // 3D Cell Culture. Methods in Molecular Biology. 2011. V.695, P.323-340.
3. Timashev P.S., et al. // High Energy Chemistry. 2015. V.49. No.4. P.300–303.



Д.В. ГАНИН<sup>1,2</sup>, К.Э. ЛАПШИН<sup>2</sup>, А.З. ОБИДИН<sup>2</sup>,  
С.К. ВАРТАПЕТОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

## **ФОРМИРОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ МИКРОСТРУКТУР В ОБЪЕМЕ ПОЛИКАРБОНАТА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Приведены результаты экспериментов по формированию графитизированных цилиндрических электропроводящих микроструктур в объеме образцов из поликарбоната (ПК) с помощью одиночных фемтосекундных лазерных импульсов. Определены условия и причины формирования протяженных графитизированных нитей с диаметрами 2 мкм и длиной более 1 мм в образцах поликарбоната.

D.V. GANIN<sup>1,2</sup>, K.E. LAPSHIN<sup>2</sup>, A.Z. OBIDIN<sup>2</sup>, S.K. VARTAPETOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

## **FEMTOSECOND LASER FABRICATION OF LINEAR GRAPHITIZED MICROSTRUCTURES IN A BULK OF POLYCARBONATE SAMPLES BY ULTRASHORT LASER PULSES**

Presents the result of experiments on the formation of graphitic conductive cylindrical microstructures in the bulk of polycarbonate (PC) samples by single femtosecond laser pulse. Were determined conditions and the reasons for the formation of elongated graphitized filaments with diameters about 2 mkm and length greater than 1 mm in polycarbonate samples.

Фемтосекундные лазеры предоставляют отличные возможности для прецизионной обработки объема прозрачных материалов. Однако в при наличии сферических аберраций или при нелинейных эффектах, форма внутренних микромодификаций может сильно отличаться от сферы и иметь вид нитей (филаментов), форма и размеры которых зависят от параметров ФС лазера, образца и условий эксперимента [1-3]. Причинами этого могут являться Керровская самофокусировка [3], пространственная модуляция лазерного пучка [4-6] и другие.

Целью работы является экспериментальное исследование пространственных характеристик графитизированных микроструктур,

формирующихся в объеме ПК под действием одиночных фемтосекундных импульсов сфокусированных сферической линзой. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Мы использовали фемтосекундный лазер ( $E_{\text{им}}=150$  мкДж, 1025 нм, 400 фс). В качестве фокусирующего объектива была использована сферическая линза с  $N.A.=0.58$  ( $f=15$  мм).

Использование сферической линзы в качестве фокусирующей системы приводит к образованию в объеме образца протяженных графитизированных структур. За один лазерный импульс с энергией 150 мкДж образуется графитизированный филамент постоянного диаметра (рис. 2) ориентированный по оси распространения излучения (ось  $z$ ) с диаметром 2 мкм с аспектным соотношением более 1000. Уменьшение энергии лазерного импульса до 120 мкДж приводит к появлению разрывов в филаменте (24 разрыва). Частота появления разрывов в филаменте уменьшается по мере удаления от линзы. Дальнейшее уменьшение энергии приводит к уменьшению общей длины филамента при сохранении положений разрывов.

Причиной формирования описанных выше графитизированных нитей является наличие лазерно-индуцированных дифракционных колец, появляющихся после прохождения излучением сферической линзы [4, 6].



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

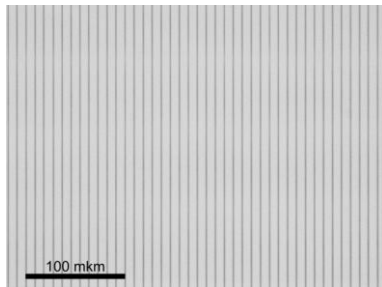


Рис. 2. Фотография графитизированных нитей

#### Список литературы

1. Vartapetov S.K., Ganin D.V., et al. // Quantum Electronics. 2015. V.45 (8). P.725.
2. Ganin D.V., Obidin A.Z., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.67-73.
3. Couairon A., Sudrie L., et al. // Phys. Rev. B. 2005. V.71. P.125435.
4. Zolotko S., Kitaeva V.F., Kroo N., Sobolev N.N., Csillag L. // JETP Lett. 1980. V.32. P.158.
5. Dergachev A.A., et al. // Laser Phys. Lett. 2015. V.12.
6. Ganin D.V., Obidin A.Z., Lapshin K.E., Vartapetov S.K. // Proc. of ICOM 2015. 2015. P.48.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН<sup>1</sup>

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

<sup>1</sup>*Дмитровградский инженерно-технологический институт НИЯУ МИФИ,  
Ульяновская обл.*

## **«ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ» ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРИОДА РЕЗОНАНСНЫХ РЕШЕТОК, ФОРМИРУЕМЫХ СКАНИРУЕМЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В СТЕКЛЕ**

В рамках универсальной поляритонной модели объяснены экспериментальные результаты по инициированному дефектами скачкообразному изменению пространственного периода резонансных нанорешеток, формируемых в стекле сканируемым фемтосекундным излучением.

V.S. MAKIN, R.S. MAKIN<sup>1</sup>

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

<sup>1</sup>*Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the NRNU MEPhI,  
Ulyanovsk region*

## **“SWITCHING” THE SPATIAL PERIOD OF RESONANT GRATINGS FORMING BY SCANNED FEMTOSECOND RADIATION IN GLASS**

The experimental results for defects initiated step-like changing of spatial periods of resonant nanogratings formed in glass by scanned femtosecond radiation were interpreted.

В [1] экспериментально обнаружен эффект «переключения» периода самосогласованно формирующейся под действием сканируемого (со скоростью  $v$ ) линейно поляризованного излучения ( $\lambda=800$  нм,  $\eta=45$  фс,  $\mathbf{E} \perp \mathbf{s}$ ) нанорешетки (G2) в стекле. Здесь  $\mathbf{s}$  - направление сканирования. «Переключение» инициировалось заранее созданными в стекле дефектами, в виде нанорешеток G1. Вначале сканируемое излучение формировало решетки с двумя различными периодами,  $d_1=220$  нм (рис. 1а) (или  $d_1=183$  нм, рис. 1б),  $\mathbf{E} \perp \mathbf{s}$  (решетки G2), см. рис. 1. Трансляция решетки G2 через дефект в виде решетки G1 вызывало изменение периода структур, формируемых после прохождения дефекта.

Предложим физическую трактовку эффекта на основе универсальной поляритонной модели. Для эксперимента, иллюстрируемого рис. 1а, решетка  $d_1$  формируется в объеме. Ее период  $d_1 = \lambda / (2\eta) = 220$  нм ( $\eta = n\xi$ ),  $\xi \approx 1,25$  отвечает взаимной интерференции поверхностных плазмон поляритонов (ППП) с противоположными направлениями распространения в объеме, на границе раздела *стекло - металлизированный диэлектрик* [2] (далее «плазма»). Решетка, возникающая в результате прохождения излучением дефекта (решетки G1), имеет период  $d_2 = \lambda / 4\eta \approx 154$  нм ( $\eta \approx 1,3$ ) и отвечает интерференции с участием ППП границы раздела воздух – плазма, см. рис. 1а. В использованной геометрии эксперимента (рис. 1а) возбуждение осуществляется почти резонансно на решетке G1, что вызывает сильный рост поглощения падающего излучения, металлизацию верхнего слоя стекла и переход к границе *воздух – плазма*. Поэтому возмущение поверхности стекла в виде исходной нанорешетки G1 вызывает трансформацию полей ППП и их возбуждение не на границе раздела *диэлектрик – плазма*, а на границе *воздух – плазма*.

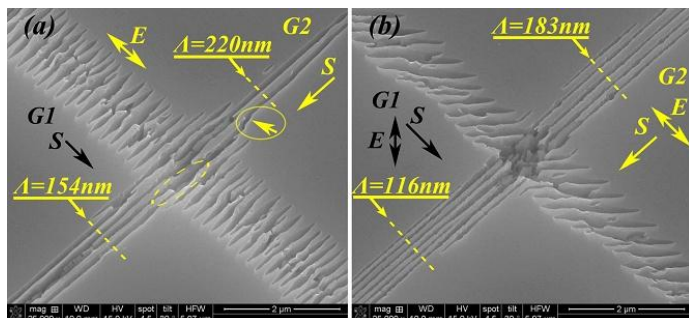


Рис. 1. Поверхность кварцевого стекла с исходными решетками G1 и формируемыми при  $Q=3,6$  Дж/см<sup>2</sup> решетками G2: а)  $p=40$ ; б)  $p=80$ , где  $p=vf$ ,  $v$ - скорость сканирования,  $f$ - частота импульсов [1]

Продемонстрирован подход, позволяющий изменять границу раздела сред, на которой осуществляется возбуждение ППП и дискретно изменять период формируемых структур.

#### Список литературы

1. Liang F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2015. V.107. P.061903.
2. Макин В.С., Макин Р.С. и др. // в сб. «Нелинейность в современном естествознании» /под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Издательство ЛКИ, 2009. С.303-322.

В.С. МАКИН, Е.И. ЛОГАЧЕВА<sup>1</sup>

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

<sup>1</sup>*Институт ядерной энергетики, Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

## **НЕУСТОЙЧИВОСТИ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ СТЕКЛА СКАНИРУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ**

В экспериментах с прямолинейным сканированием линейно поляризованного излучения непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера по поверхности стекла наблюдалось непрямолинейное волнообразное распространение трещины. В области ее распространения формировались поверхностные резонансные микрорешетки.

V.S. MAKIN, E.I. LOGACHEVA<sup>1</sup>

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

<sup>1</sup>*Institute for Nuclear Energetic, Sosnovy Bor, Leningrad region*

## **INSTABILITY OF GLASS BRITTLE CRACKING BY SCANNED LASER RADIATION**

In experiments with linearly polarized radiation cw CO<sub>2</sub>-laser radiation scanned along straight line of a glass surface a wave like cracking was observed. In the crack formation area the resonant surface microgratings were formed.

Исследование процесса распространения трещин в хрупких материалах [1] под действием тепловой нагрузки обнаруживает помимо прямолинейной траектории распространения трещин более сложные траектории: осцилляции, ветвления, фрактальную структуру разрушения.

В наших экспериментах температурный градиент в стеклянной пластине создавался при прямолинейном сканировании лазерного пучка по ее поверхности. При неизменной плотности мощности излучения ( $q$ ) лазера и последовательном увеличении скорости сканирования ( $v$ ) наблюдались три основных типа несквозных трещин - в виде прямой линии, волнообразные трещины и бифуркационное поведение в виде "Y". Для стеклянных пластин толщиной  $t=1,8$  мм,  $q \approx 5$  кВт/см<sup>2</sup> и  $v=10$  мм/с трещина имел вид синусоиды с амплитудой  $\sim 150$  мкм и характерным периодом  $d \sim 900$  мкм (см. рис. 1). Увеличение скорости сканирования до  $v=20$  мм/с приводило к уменьшению амплитуды (до 100 мкм) и периода (до 460 мкм) синусоиды.



Рис. 1. Фотография сформированной волнообразной трещины в стекле

При сканировании поверхности кварцевого стекла толщиной 300 мкм при  $q$ , вызывающих локальное размягчение поверхности стекла и  $v=35$  мм/с, трещины имела вид синусоиды с амплитудой  $\sim 40$  мкм и  $d \sim 500$  мкм. Эффект наблюдался для линейно поляризованного излучения и ориентации вектора  $\vec{E}_t \parallel \vec{s}$ , где  $\vec{E}_t$  - тангенциальная проекция вектора напряженности электрического поля лазерного излучения,  $\vec{s}$  - направление сканирования излучения. Изучение следа воздействия лазерного излучения на поверхности стекла позволило обнаружить следы остаточной регулярной решетки рельефа  $\vec{g} \parallel \vec{E}_t$  с периодом  $\sim 1,3$  мкм. Нагретая граница раздела кварцевое стекло – воздух поддерживает существование поверхностных фонон поляритонов (ПФП) [2]. Их возбуждение в направлении вектора  $\vec{E}_t$  и интерференция приводит к формированию комплексной решетки рельефа и диэлектрической проницаемости  $\vec{g}$  с  $d = \lambda / (2k\eta) = 10,6 / (2 \cdot 4 \cdot 1,02) \sim 1,3$  мкм. [3], где  $k = 1, 2, 4, 8, \dots$ ,  $\eta$  - действительная часть показателя преломления границы раздела *стекло-воздух* для ПФП. В процессе распространения трещины в твердом теле существенная роль принадлежит взаимодействию макротрещины и ансамбля микродефектов в зоне материала, примыкающей к вершине трещины [4]. Дополнительное увеличение латентной энергии в области материала, примыкающей к вершине трещины, может осуществляться за счет энергии, переносимой ПФП, возбуждаемых на согласованно формируемых резонансных решетках и вносить заметный вклад в динамику развития трещин.

#### Список литературы

1. Boue T.G., Cohen G., Fineberg J. Origin of the microbranching instability in rapid cracks // Phys. Rev. Lett. 2015. V.114. P.054301.
2. Makin V.S., Pestov Yu.I. Formation of relief gratings and refractive index gratings on quartz glass under the action of the radiation of a TEA CO<sub>2</sub> laser. // J.I of Optical Technology. 2004. V.71. No.8. P.527-531.
3. Макин В.С., Макин Р.С., Воробьев А.Я., Гуо Ч. Универсальность Фейгенбаума и порядок Шарковского в лазерно-индуцированных периодических структурах на поверхностях и в объеме конденсированных сред // в сб. Нелинейность в современном естествознании / под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: Издательство ЛКИ. 2009. С.303.
4. Plekhov O.A. Modeling of stochastic properties of fast cracks in quasi-brittle materials. // Computational Materials Science. 2003. V.28. P.462.

А.С. ЛЕВЧЕНКО, Д.Р. ФРОЛОВ, А.А. БАБЕНКО,  
Н.Д. НИКИФОРОВ, К.С. КОРОТКОВ, А.Н. РУДОМАН  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ПОЛУЧЕНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ДВУНАПРАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА**

Теоретически предложен новый метод получения электрооптических и оптоэлектронных S-параметров двунаправленного электрооптического четырехполюсника (bilateral electro-optic network – BEON). Использование двух BEON и этого метода позволяет проводить оптоэлектронные измерения стандартным векторным анализатором цепей без использования дополнительного электрооптического оборудования.

A.S. LEVCHENKO, D.R. FROLOV, A.A. BABENKO,  
N.D. NIKIFOROV, K.S. KOROTKOV, A.N. RUDOMAN  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **EXTRACTING S-PARAMETERS OF BILATERAL ELECTRO-OPTIC NETWORK**

A new method for extracting E/O and O/E S-parameters of a bilateral electro-optic network (BEON) is theoretically proposed. Using two BEONs and this technique allows to make calibrated lightwave measurements with a standard vector network analyzer without using additional electro-optical equipment.

Двунаправленный электрооптический четырехполюсник (BEON или ДЭОЧ) и его использование в экспериментальном анализе оптических цепей впервые отмечены Поллардом [1,2]. Использование ДЭОЧ в анализаторах оптических цепей вместо отдельных лазерных диодов и фотодетекторов дает возможность использовать оптический аналог различных двухпортовых видов калибровок таких, как TRL (thru, reflect, line), которые обычно применяются в векторных анализаторах цепей (ВАЦ) СВЧ-диапазона. Однако предложенные Поллардом измерения проводятся с помощью сложных оптоэлектронных устройств, включающих лазеры, анализатор спектра, систему управления температурой, различные линзы и устройства управления поляризацией. Это может быть серьезным недостатком в случае, если требуется получить характеристики неизвестного фотодетектора либо ДЭОЧ, поскольку такие измерения невозможно выполнить с помощью

стандартного анализатора оптических компонентов, такого, как например НР8703А.

Предлагаемый нами новый метод [3] основан на измерении с помощью обычного ВАЦ с присоединенным к его порту своим электрическим портом ДЭОЧа комплексных коэффициентов отражения от трех оптических нагрузок: поглотителя и двух зеркал. Он включает две последовательности измерений коэффициентов отражения: первая, когда нагрузки подключены к оптическому порту ДЭОЧа напрямую и вторая, когда нагрузки подключены последовательно с оптическим волноводом определенной длины. Для получения S-параметров ДЭОЧа этим методом необходимо точно знать лишь параметры оптического эквивалента короткого замыкания (зеркала), которые несложно вычислить исходя из геометрических размеров, а изготовить такое зеркало для определенной оптической длины волны не составляет большой сложности. Эквивалент согласованной нагрузки – оптический поглотитель также может быть изготовлен достаточно просто.

В результате измерений получается система из шести уравнений, решение которой позволяет получить полную матрицу комплексных параметров рассеяния исследуемой ДЭОЧ.

Преимущества предлагаемой калибровочной процедуры следующие:

1) Отсутствие необходимости изготовления нескольких точных стандартов оптических нагрузок и измерения их параметров. Требуется получение точных характеристик только для одной нагрузки (зеркала).

2) Возможность расчета неточности калибровки и отсутствие необходимости калибровки оптического порта ДЭОЧ другим оптическим анализатором.

3) Используя такой метод калибровки, возможно проведение измерений оптических компонентов, используя лишь обычный ВАЦ и пару ДЭОЧ.

#### *Список литературы*

1. Iezekiel S., Elamaran B. Pollard R. Recent developments in lightwave network analysis // Engineering Science and Educational Journal. 2000. V.12. P.247.
2. Pollard R. Developments in lightwave S-parameters measurement techniques // IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology. 2002. V.149. Is.6. P.345.
3. Frolov D.R., Levchenko A.S. Extracting S-parameters of bilateral electro-optic network for lightwave component analyzer calibration // 2nd International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures. Book of Abstracts. St. Petersburg, 2015. P.183-185.



С.М. КОСТРИЦКИЙ, Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ,  
О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ<sup>1</sup>, И.М. ЧИРКОВА<sup>1</sup>

*НПК Оптилинк, Зеленоград*

*<sup>1</sup>Кемеровский государственный университет*

## **ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ НА ОСНОВЕ ПРОТОНООБМЕННЫХ LiNbO<sub>3</sub> ВОЛНОВОДОВ**

Установлено, что электрооптическая эффективность фазовых модуляторов волноводов зависят от их фазового состава. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления фазовых модуляторов на основе канальных волноводов в кристаллах LiNbO<sub>3</sub>.

S.M. KOSTRITSKII, Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV,  
O.G. SEVOSTYANOV<sup>1</sup>, I.M. CHIRKOVA<sup>1</sup>

*RPC Optolink Ltd, Zelenograd*

*<sup>1</sup>Kemerovo State University*

## **ELECTROOPTIC EFFICIENCY OF PHASE MODULATORS WITH PROTON-EXCHANGED LiNbO<sub>3</sub> WAVEGUIDES**

Electrooptic efficiency of the modulators utilizing the channel proton-exchanged waveguides has been found to be depending on their chemical composition. Our experimental findings allowed for the optimization of technology for production of phase modulators based on channel waveguides in LiNbO<sub>3</sub> crystals.

Электрооптические (ЭО) фазовые модуляторы были изготовлены на основе канальных протонобменных (ПО) волноводов. Оптическая структура фазового модулятора представляет собой прямой канальный волновод с шириной канала 6 мкм. Электродная структура состоит из двух электродов, находящихся в одной плоскости с волноводом. Канальные оптические волноводы были изготовлены на пластинах X-среза кристалла LiNbO<sub>3</sub> методом протонного обмена с использованием бензойной кислоты. Для получения волноводов различного фазового состава, технологические условия изготовления волноводов варьировались в широких пределах, так время протонного обмена изменялось от 1 до 17 часов, а температура от 175 до 190 °С, в качестве источника протонов использовалась чистая бензойная кислота. Отжиг варьировался в еще более широких пределах: время от 0,5 до 28 часов,

температура от 300 до 370 °С. Технологическая операция постобменного отжига является важной и практически неотъемлемой операцией, позволяющей модифицировать и стабилизировать свойства ПО волноводов в  $\text{LiNbO}_3$  [1].

Напряжение  $V_\pi$ , приложенное к электродам фазового модулятора, приводящее к изменению фазы на  $\pi$ , называется полуволновым напряжением ( $V_\pi = G\lambda/Ln_e^3 r_{33}$ ,  $G$ - зазор между электродами,  $L$ - длина электродов,  $n_e$  – необыкновенный показатель преломления,  $r_{33}$ - ЭО коэффициент) и характеризует ЭО эффективность фазового модулятора. ЭО эффективность фазовых модуляторов измеряли с помощью волоконного интерферометра Саньяка, использующего суперлюминесцентный диод с центральной длиной волны  $\lambda \approx 1550$  нм (ширина полосы излучения 50 нм). Необходимо отметить, что эффективные значения  $r_{33}$ , полученные из прямых измерений ЭО эффективности модуляторов, существенно меньше локальных значений  $r_{33}$ , определённых ранее [2]. Это различие может быть связано с эффектом экранирования в неоднородных структурно разупорядоченных волноводах.

Применение влажного воздуха для постобменного отжига, как ожидается, может улучшить ЭО свойства волноводов с большим значением  $\Delta n_e$ , так как происходит значительное снижение разупорядочения в приповерхностном слое по сравнению со стандартной процедурой отжига в сухом воздухе [2]. Действительно, наше сравнительное исследование показало, что ПО волноводы, полученные отжигом во влажной атмосфере и содержащие  $\alpha$  фазу, имеют оптимальное сочетание оптических потерь и ЭО коэффициента  $r_{33}$  для практического применения. Для определения фазового состава канальных ПО волноводов мы использовали спектроскопию микро-КРС, так как спектры КРС различных фаз существенно отличаются друг от друга [1], а использование конфокального микроскопа в микро-КРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение (около 1 мкм), достаточное для детального исследования поперечного профиля канальных волноводов и интегрально-оптических схем на их основе.

#### *Список литературы*

1. Кострицкий С.М., Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Севостьянов О.Г., Чиркова И.М., Митрохин В.П. Фазовый состав и электрооптические свойства протонобменных волноводов в кристаллах ниобата лития // ЖПС. 2015. Т.82. С.240-247.
2. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. Electro-optical properties of different  $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$  phases in proton-exchanged  $\text{LiNbO}_3$  waveguides // Ferroelectrics. 2012. V.440. P.47-56.

М.М. ВЕКШИН, А.Д. КУЗЬМЕНКО,  
В.А. НИКИТИН, Н.А. ЯКОВЕНКО

*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЗАГЛУБЛЕННЫХ $\text{Ag}^+$ -ВОЛНОВОДАХ В СТЕКЛЕ К-8**

Представлены результаты измерений оптических потерь в волоконно-совместимых интегрально-оптических одномодовых волноводах, полученных путем ионного обмена  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  в стекле типа К-8 с последующим электростимулированным заглублением канала. Потери составляют  $\sim 1$  дБ/см.

M.M. VEKSHIN, A.D. KUZMENKO,  
V.A. NIKITIN, N.A. YAKOVENKO

*Kuban State University, Krasnodar*

## **OPTICAL LOSS MEASUREMENT IN BURIED $\text{Ag}^+$ -WAVEGUIDES, FABRICATED IN K-8 GLASS**

The results of optical propagation loss measurements in fiber-compatible integrated-optic single-mode waveguides, fabricated by  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  ion exchange in K-8 glass with additional field-assisted burial of waveguide core. The losses are of an order of 1 dB per centimeter.

Возможности использования той или иной технологии интегральной оптики для изготовления волноводных схем различного функционального назначения с заданными характеристиками зависят от параметров самих волноводов. Поэтому актуальными являются вопросы измерения параметров оптических волноводов, таких как оптические погонные потери, потери на изгибах, апертура, размеры модового поля, и ряд других.

Целью работы является измерение погонных потерь в прямолинейных заглубленных волноводах, полученных методом ионного обмена  $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$  в стекле К-8 с последующим заглублением канала. Такая технология позволяет формировать волоконно-совместимые волноводы. Измерения потерь проводились на длине волны 1.55 мкм.

Образцы изготовлялись в оптическом стекле К-8. Использовался разбавленный расплав солей  $\text{AgNO}_3/\text{NaNO}_3$  в молярном соотношении 1:200 для уменьшения вероятности образования коллоидных частиц на

поверхности стекла и под краями маски. Для подбора одномодового режима температура процесса ионного обмена и его время варьировались: температура в диапазоне 350-390 С°, время в диапазоне 35-100 минут. С той же целью подбиралось время электростимулированного заглабления в расплаве NaNO<sub>3</sub>. Для измерения потерь применялись три различные методики. Измерения проводились на специализированном оптическом стенде. В качестве зонда для ввода и вывода излучения использовались волоконные световоды. Для измерения мощности использовался оптический тестер JDSU OLT-55.

Согласной первой методике измерения [1], через образец с волноводами длиной 40 мм оптическое излучение пропусклось поочередно в двух взаимно противоположных направлениях с измерением выходной мощности. Это давало возможность разделить потери на стыковку с волокном и погонные потери при распространении света в волноводных каналах. Измеренные значения потерь составили 1.1÷1.3 дБ/см.

Согласной второй методике [2] проводилось измерение потерь с использованием прямой и отраженной мощности излучения. Использовался измеритель обратных потерь типа JDSU ORL-55. Измеренные значения потерь составили 1÷1.5 дБ/см. На наш взгляд, данная методика является среди трех используемых самой неточной, так как необходимо очень точно измерять очень малую величину обратного отражения от торцов волновода.

По третьей методике измерения [3] тот же образец с волноводами после измерения проходящей через него мощности был разрезан напополам и проведены аналогичные повторные измерения мощности. Измеренные значения потерь составили 1.2÷1.4 дБ/см.

Измеренные значения потерь согласуются между собой. Достаточно высокие потери в волноводах обусловлены главным образом поглощением оптического излучения частицами коллоидального серебра, присутствующего в волноводных каналах, что свидетельствует о необходимости корректировки самой технологии формирования волноводов и подборе подходящих стеклянных матриц.

#### *Список литературы*

1. Nguyen T.-N, Lengle K., Thual M. Nondestructive method to measure coupling and propagation losses in optical guided structures // J. Opt. Soc. Am. B. 2012. V.29. N12. P.3393-3397.
2. Barai S., Selvarajan A., Srinivas T. A novel technique to measure the propagation loss of integrated optical waveguides// IEEE Photonics Technology Letters. 2005. V.17. N2. P.360-362.
3. Хансперджер Р. Интегральная оптика: теория и технология. М.: Мир, 1985.

О.Э. БАБКИН, В.В. ИЛЬИНА, А.А. МЕЛИДИНА  
*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения*

## **РАЗРАБОТКА МАТЕРИАЛА ДЛЯ ЦВЕТОВОГО КОДИРОВАНИЯ ОПТОВОЛОКОННЫХ КАБЕЛЕЙ**

Волоконно-оптические кабели (ВОК) – интенсивно развивающаяся технология связи. В работе представлены результаты разработок в области создания защитно-декоративного покрытия для цветового кодирования оптических волокон, созданного технологией ультрафиолетового отверждения.

O.E. BABKIN, V.V. ILINA, A.A. MELIDINA  
*Saint Petersburg State Institute of Film and Television*

## **DEVELOPMENT OF MATERIAL FOR COLOR CODING OF FIBER OPTIC CABLES**

Fiber optic cables (FOC) is a rapidly developing communications technology. In article presents the results of development in area of protective and decorative coatings for color coding optical fibers, developed by UV curing technology.

В основе технологии передачи информации по волоконно-оптическим линиям связи лежит передача электромагнитных волн инфракрасного диапазона по принципу полного внутреннего отражения, эффект которого достигается за счет защитного покрытия оптоволокна. Область применения ВОК зависит от природы входящего в него оптического волокна: POF (полимерное волокно), PCF (стекловолокно с защитным полимерным покрытием) или GOF (стекловолокно), и достаточно широка.

Основным элементом ВОК является оптическое волокно, чувствительное к внешним воздействиям (температуре, влажности, изгибам, механическому давлению), поэтому для его стабильной защиты обязательно накладывается защитное покрытие, и с целью цветовой идентификации – колорированный слой толщиной 3-6 мкм.

В настоящее время цветовая маркировка наносится либо методом принтерной печати с закреплением на поверхности плазмогенератором либо послойным нанесением лаковых слоев, из которых как минимум один имеет пигментную составляющую. В данной работе для нанесения цветовой маркировки использована технология ультрафиолетового отверждения (УФ-отверждения), которая обеспечивает создание сверхтонких пигментированных покрытий широкой цветовой гаммы

конвейерной технологией со скоростью окраски до 1800 м/мин, обладающих высокой адгезионной прочностью к покрываемому оптическому волокну и высокой цветовой стойкостью покрытий, которые также характеризуются высокими защитными характеристиками. Преимуществом использования технологии УФ-отверждения для создания маркирующего покрытия оптического волокна является также дополнительная гидроизоляция оптических кабелей [1].

В работе исследованы фотополимеризующиеся композиции на основе акрилатов. Выбор пигментов определялся спектром их поглощения, с учетом используемого ультрафиолетового инициирования процесса полимеризации системы, размером и формой частиц [2, 3].

В работе исследованы рецептуры фотополимеризующихся композиций на основе бисфенол-А-эпоксидиакрилата в 20% ТПГДА, бисфенол-А-эпоксидиакрилата в 20% ТМГПА, алифатического уретанового триакрилата, алифатического уретанового триакрилата в 25% ТПГДА с добавками 2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфиноксида,  $\alpha$ -фенилфеноксиптилакрилата, бензофенона.

Композиции с добавками промотера адгезии и растекателя готовили в скоростном диссоolvere в течение 10 мин. Композиции наносили на стеклянные пластинки и отверждали на установке ОРК-21 М1 с ртутной лампой ДРТ-400. Интенсивность (Н) УФ-излучения регистрировали с помощью УФ-фотометра UV Power Puck II:  $H_A=135\text{ мВт/см}^2$ ;  $H_B=150\text{ мВт/см}^2$ ;  $H_C=24\text{ мВт/см}^2$ ;  $H_D=90\text{ мВт/см}^2$ . Толщину покрытия измеряли прибором «Константа К5». Адгезионную прочность измеряли прибором Neurtek KN-10 по ISO 4624.

Наилучшие показатели по адгезии к стеклу  $2,2\pm 0,5$  МПа показали образцы на основе алифатического уретанового триакрилата, при значениях поверхностной энергии покрытия  $50\pm 1$  мДж/м<sup>2</sup>. В качестве пигментов исследован белый диоксид титана, введение которого приводит к незначительным изменениям поверхностной энергии (не более 10%) и адгезии (не более 15%).

#### *Список литературы*

1. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В. Композиции УФ-отверждения для антикоррозионной защиты // Лакокрасочные материалы и их применение. 2014. № 3.
2. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Максимова М.А., Есеновский А.Г., Проскурязов С.В. Рецептурные особенности эмалей УФ-отверждения // Лакокрасочные материалы и их применение. 2012. №6.
3. Бабкин О.Э., Максимова М.А., Бабкина Л.А. Влияние размеров и формы частиц пигментов на реактивность УФ-композиций // Лакокрасочные материалы и их применение. 2013. №4.

**Б.А. КУЗЯКОВ**

*Московский государственный университет информационных технологий,  
радиотехники и электроники*

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ФОТОНОВ В ОПТИЧЕСКИХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ ЛИНИЯХ**

В работе рассматриваются методы реализации разнообразных состояний орбитальных угловых моментов фотонов. Показано, что методика с использованием одиночного специализированного фазового элемента позволяет создавать одновременно несколько десятков таких состояний.

**B.A. KUZYAKOV**

*Moscow State University of Information Technologies, Radioengineering and Electronics*

## **PERSPECTIVE METHODS OF IMPLEMENTATION OF THE ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF PHOTONS AT THE OPTICAL TELECOMMUNICATION LINES**

The paper deals with methods of implementing a variety of orbital angular momentum states of photons. It is shown that the method using a single dedicated phase element can create multiple tens of such conditions.

Относительную эффективность оптического телекоммуникационного канала можно повысить на основе использования орбитальных угловых моментов фотонов (ОАМ) [1, 2]. Среди методов создания ОАМ выделяются несколько наиболее эффективных: 1) в работе [1] для формирования лазерного пучка на входе и выходе оптической системы, используются отражательные голограммы; 2) рассматриваются варианты выбора ОАМ с использованием внутренней конической дифракции; 3) для генерации выбранных состояний ОАМ может использоваться нелинейное кольцевое кварцевое волокно и параметрическая конверсия «вниз» [3]; 4) в методе электроконтроля состояний ОАМ применяют одноосный кристалл стронций-барий-ниобат (СБН), к которому прикладывается электрическое напряжение  $E^*$  и четвертьволновые пластины [4]; 5) применение магнитооптического эффекта для настройки потока фотонов, рассматривается в работе [5]; 6) одновременно более 50 различных состояний ОАМ могут быть реализованы (рис. 1) при использовании одиночного специализированного фазового элемента [6].

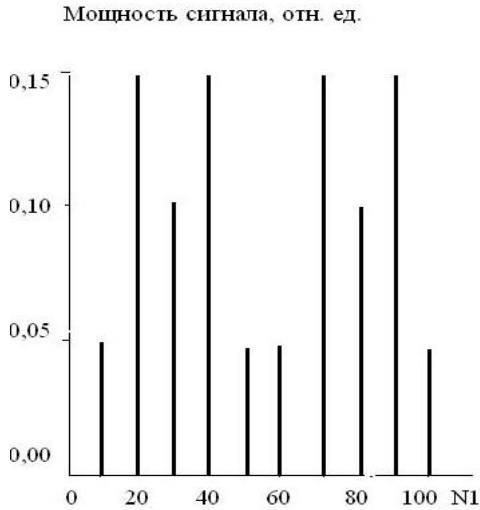


Рис. 1. Зависимость мощности сигнала на мишени от топологического номера моды (N1) OAM

Таким образом, рассмотрен ряд перспективных методов реализации различных состояний OAM для многообразных оптических линий телекоммуникаций.

*Список литературы*

1. Gibson G., Courtial J., Padgett M., Vasnetsov M., Pas'ko V., Barnett S., Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // *Optics Express*. 2004. V.12. Is.22. P.5448-5456.
2. Засовин Э.А., Кузяков Б.А., Тихонов Р.В., Шмелёв В.А. Повышение доступности оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами // *Научный журнал «Ученые записки РГСУ»*. 2014. №4. Т.1. С.175-181.
3. Javurek D., Svozilik J., Perina Jr.J. Proposal for the generation of photon pairs with nonzero orbital angular momentum in a ring fiber // *Optics Express*. 2014. V.22. No.19. P.23743-23748.
4. Zhu Cr.W., She W. Electrically controlling spin and orbital angular momentum of a focused light beam in a uniaxial crystal // *Optics Express*. 2012. V.20. Is.23. P.25876-25883.
5. Yang M., Li T.-F., Sheng Q.-W., Guo T.-J., Guo Q.-H., Cui H.-X., Chen J. Manipulation of dark photonic angular momentum states via magneto-optical effect for tunable slow-light performance // *Optics Express*. 2013. V.21. Is.21. P.25035-25044.
6. Zhu L., Wang J. Simultaneous generation of multiple orbital angular momentum modes using a single phase-only element // *Optics Express*. 2015. V.23. No.20. P.26221-26233.



А.П. ПЛЁНКИН

*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИЩЕННОСТИ АЛГОРИТМА ОБНАРУЖЕНИЯ ФОТОННОГО ИМПУЛЬСА В СИСТЕМЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА**

Приведены алгоритмы синхронизации волоконно-оптических автокомпенсационных систем квантового распределения ключа (СКРК) с фазовым кодированием состояний фотонов. Предложен алгоритм, обеспечивающий повышенную защищенность процесса обнаружения фотонного импульса при синхронизации СКРК. Показано повышение вероятности обнаружения фотонного импульса при использовании разработанного алгоритма.

A.P. PLJONKIN

*Southern Federal University, Taganrog*

## **IMPROVING THE SECURITY OF PHOTON DETECTION ALGORITHM IN QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM**

Algorithms sync of fiber-optic autocompensation quantum key distribution system (QKDS) with phase-encoded states of photons are presented. An algorithm, providing increased security of the detection of the photon pulse synchronization QKDS are proposed. Shows the increase probability of detecting a photon pulse using the developed algorithm.

Назначение и принцип работы успешно реализованных коммерческих волоконно-оптических СКРК описан в [1, 2]. Функционирование СКРК невозможно без синхронизации. Формирование и распределение квантовых ключей протекает в однофотонном режиме, где среднее число фотонов в импульсе равно 0,1. Установлено, что синхронизация в СКРК основывается на регистрации многофотонных импульсов [3], что потенциально позволяет злоумышленнику использовать часть энергии для синхронизации своей аппаратуры и осуществления несанкционированного доступа.

Предложен алгоритм синхронизации автокомпенсационной СКРК, предполагающий деление периода следования оптических импульсов на временные окна и обнаружение сигнального окна. Особенность исследуемого алгоритма синхронизации состоит в том, что он реализуется в однофотонном режиме (среднее число фотонов в импульсе

составляет 0,1), повышая безопасность режима синхронизации СКРК. Вторая особенность алгоритма состоит в том, что при равенстве числа накопленных импульсов в двух соседних временных окнах принимается решение о приёме фотонного импульса любым из этих окон, если количество накопленных импульсов в нём превышает число зарегистрированных импульсов в остальных окнах. В известном алгоритме в таком случае оба окна принимались шумовыми, что являлось причиной пропуска сигнального окна [4].

Предлагаемый алгоритм поиска фотонного импульса повышает защищённость СКРК, уменьшая вероятность принятия ошибочного решения в случае равенства числа накопленных импульсов в соседних сигнальных временных окнах при распределении между ними энергии фотонных импульсов. Выигрыш предлагаемого алгоритма очевиден в том случае, когда длительность фотонного импульса вдвое меньше длительности временного окна. Получены аналитические выражения для расчёта вероятности правильного обнаружения временного окна, содержащего фотонный импульс. Для доказательства работоспособности проведено моделирование алгоритма и показана возможность использования аналитических выражений для инженерных расчётов эффективности синхронизации СКРК [5].

Работа выполнена при поддержке «ИнфоТеКС Академия 2015-2016».

#### *Список литературы*

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V.74. No.1. P.145-195.
2. Румянцев К.Е. Системы квантового распределения ключа: Монография. Таганрог: Издательство ТТИ ЮФУ, 2011.
3. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа при использовании фотонных импульсов для повышения защищённости // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2014. № 8. С.81–96.
4. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Синхронизация системы квантового распределения ключа в режиме однофотонной регистрации импульсов для повышения защищённости. // *Радиотехника*. 2015. №2. С.125-134.
5. Румянцев К.Е., Плёнкин А.П. Безопасность режима синхронизации системы квантового распределения ключей // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. №5(166). С.135 – 153.

С.А. ПЛИВАК, А.С. ШУМИЛИН  
*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ЗАЩИЩЕННАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ VLC-ТЕХНОЛОГИИ**

Рассмотрен аспект применения технологии VLC, основанной на использовании видимого оптического излучения для передачи информации. Обоснована актуальность использования данной технологии при организации защищенной связи.

S.A. PLIVAK, A.S. SHUMILIN  
*Southern Federal University, Taganrog*

## **SECURED DATA TRANSMISSION SYSTEM BASED ON THE VLC-TECHNOLOGY**

This article discusses aspects of the application of technology VLC, based on the use of visible light to transmit information. The relevance of this technology in the organization of secure communication is justified.

Использование беспроводных сетей Wi-Fi в различных организациях является одним из наиболее уязвимых мест для перехвата информации злоумышленниками. Метод передачи данных на основе VLC (*visible light communication* – передача данных видимым светом) видится одним из подходов к решению проблемы повышенной уязвимости корпоративной сети.

В основе технологии VLC лежит открытая оптическая система связи, при этом передающий модуль встроен в систему освещения обслуживаемого помещения. [1, 2]

На рис. 1. показан принцип работы VLC технологии в помещении, требующем повышенного уровня информационной безопасности.

При использовании сети Wi-Fi зона риска составляет до 10-20 метров. Используя VLC-технологии, можно сократить эту зону до нескольких метров. Структурная схема VLC-системы приведена на рис. 2.

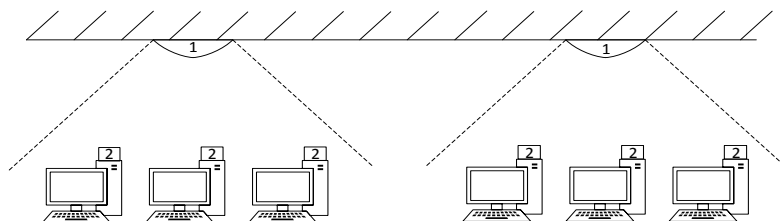


Рис. 1. Принцип работы VLC-технологии в помещении (1-передающий модуль; 2-принимающий модуль)

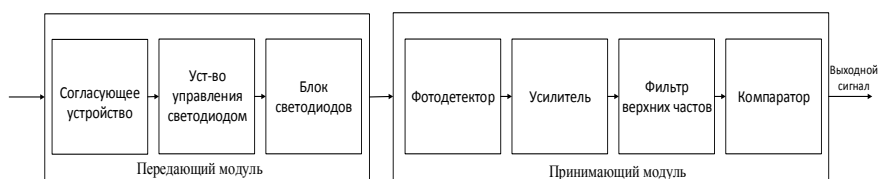


Рис. 2. Структурная схема системы, реализующая VLC-технологии

Передающий модуль включает в себя согласующее устройство, приводящее параметры входного цифрового сигнала к параметрам для управления блоком светодиодов через соответствующее устройство управления.

В приемном модуле на абонентском устройстве оптический сигнал преобразуется фотодетектором в электрический и усиливается по мощности в усилителе сигнала. Фильтр высоких частот позволяет избавиться от шумов. На выходе цепи установлен компаратор, для преобразования аналогового сигнала в цифровой.

Таким образом, метод передачи сигнала на основе VLC-технологии, является потенциально более актуальной с точки зрения информационной безопасности и может составить основу защищенной корпоративной сети.

#### *Список литературы*

1. Vijayalakshmi S.B. Design and implementation of visible light communication system in indoor environment // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. V.10. №.7. P. 2282-2286.
2. Singh J., Vikash J. A new era in wireless technology using light-Fidelity // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. 2014. V.2. Is.6. P.46-49.

**А.А. ИЛЬЯСОВА, А.Ф. РЫБАСЬ, С.И. ХАЛИЛОВ**

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ СИГНАЛА В ПУЧКЕ,  
ПЕРЕНОСЯЩЕГО ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ,  
ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МАЛОМОДОВОГО ВОЛОКНА**

На сегодняшний день существует несколько способов увеличения пропускной способности волоконных линий связи. Технологии мультиплексирования и демultipлексирования сигналов в оптическом волокне позволяют увеличить пропускную способность оптических волокон. Ранее в данных методах использовались стандартные, Гауссовы пучки. Объектом же нашего исследования являются пучки Лагерра-Гаусса, которые за счет снятия вырождения сигнала в волокне, обусловленного спин-орбитальным взаимодействием угловых моментов пучка позволяют увеличить количество каналов прохождения сигнала в волокне.

**A.A. ILYASOVA, A.F. RUBASS, S.I. HALILOV**

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

**INVESTIGATION OF SIGNAL MULTIPLEXING  
OF THE BEAMS CARRYING OPTICAL VORTICES  
AFTER PASSING THROUGH LOW MODE FIBER**

Today, there are several ways to increase the capacity of the optical fibers. Technology multiplexing and demultiplexing signals in the optical fiber can increase the bandwidth of optical fibers. Earlier these methods were used standard Gaussian beams. The object of our investigation are the Laguerre-Gaussian beams, which due to the removal of degeneracy of the signal in the fiber caused by the spin-orbit coupling of the angular moments of the beam can increase the number of channels of the signal in the fiber.

Принцип экспериментального исследования заключается в том, что после разделения линейнополяризованного сигнала на два, имеющих лево и правоциркулярную поляризацию, мультиплексировать сигнал. И на выходе волокна, проанализировав суперпозицию пучков по модовому составу, мы можем различить входной сигнал. Разделение пучков по орбитальным угловым моментам осуществляется интерферометрическими методами. Идентификация пучков по состоянию поля осуществляется Стокс-поляриметром, позволяющий определить

полное состояние поляризации пучка, из которого можно выделить первоначальное излучение.

Экспериментальное исследование проводилось на экспериментальной установке, представленной на рис. 1. Линейнополяризованное излучение He-Ne ( $Ls_1$ ) лазера с длиной волны  $\lambda = 0.6328 \text{ мкм}$ , проходя через делительный кубик ( $Bs$ ), разделяется на два пучка. Пучки Гаусса проходят через диэлектрические клинья ( $C1$  и  $C2$ ) и дифрагируют, рождая оптические вихри. Далее проходят через поляризаторы ( $P1$  и  $P2$ ) и составные фазовые пластинки  $\lambda/4$ . Затем сводим два пучка на кубике ( $Bs$ ). После прохождения по волокну результаты фиксирует CCD камера.

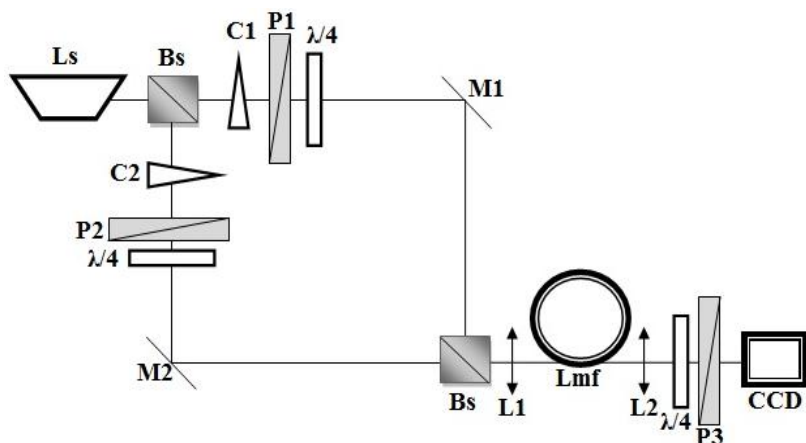


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:  $Ls$  - лазер,  $P$  - поляризатор,  $\lambda/4$  - четвертьволновая пластинка,  $Bs$  - делительный кубик,  $L$  - линза,  $M$  - зеркало,  $C$  - диэлектрический клин,  $Lmf$  - маломодовое волокно ( $V=3.4$ ),  $CCD$  – камера

При интерференционном сложении двух пучков с одинаковой интенсивностью, разными по знаку топологическими зарядами и ортогональной циркулярной поляризацией итоговое поле будет аксиально симметрично. Экспериментально продемонстрирована возможность мультиплексирования сложного сигнала, в оптическом маломодовом волокне, подаваемого пучками с топологическим зарядом противоположного знака и ортогональной поляризацией.

С.И. ХАЛИЛОВ, А.Ф. РЫБАСЬ

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ДЕМУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ СИГНАЛА В ПУЧКЕ,  
ПЕРЕНОСЯЩЕГО ОПТИЧЕСКИЕ ВИХРИ ПОСЛЕ  
ПРОХОЖДЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО МАЛОМОДОВОГО  
ВОЛОКНА**

Скорость передачи данных в оптических волокнах приближается к своему пику. Использование орбитального углового момента пучка, позволят значительно увеличить количество каналов в линиях связи, за счёт снятия вырождения сигнала в волокне. Такое свойство пучков Лаггера-Гаусса, может использоваться в сочетании с другими параметрами как длина волны излучения и поляризация, при мультиплексирование и демультиплексировании сигнала.

S.I. HALILOV, A.F. RUBASS

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

**INVESTIGATION OF SIGNAL DEMULTIPLEXING IN BEAM  
LAGUERRE-GAUSSIAN AFTER PASSING LOW MODE FIBER**

The data rate optical fibers approaching its peak. Using the orbital angular momentum of optical vortex, will significantly increase the number of channels in the communication lines due to removal of degeneracy of the signal in the fiber. Such property of Laguerre-Gaussian beams can be used in conjunction with other parameters such as the emission wavelength and polarization multiplexing and demultiplexing the signal.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, представленной на рис. 1. Пучки, излучающие от источника света Ls1 ( $\lambda_1=0.6328$  мкм) с право-циркулярной поляризацией и от источника света Ls2 ( $\lambda_2=0.532$  мкм) с лево-циркулярной поляризацией, проходя через фазовые транспаранты (Tr1) и (Tr2), дифрагируя, образуя угловой спектр-состоящий из оптических вихрей. С помощью диафрагмы выделяем единичные вихри с топологическими зарядами  $l=1$  для Ls1 и  $l=2$  для Ls2. На делительном кубике (Bs) сводим 2 вихря и линзой (L1) соосно проецируем в торец малоимодового оптического волокна.(Lmf) После прохождения волокна, поле излучения попадая на призму (Pr), разделяет сигнал на 2 пучка с различными длинами волн. Затем производится

измерение состояний поляризации данных пучков методом Сток-поляриметрии. Результат фиксирует CCD камера.

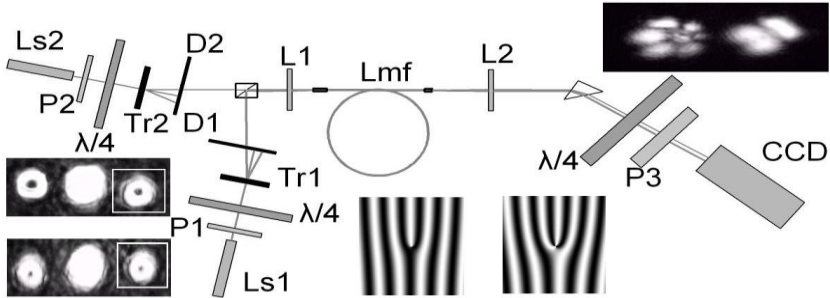


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Ls - лазер, P - поляризатор,  $\lambda/4$  - четвертьволновая пластинка, Tr - фазовый транспарант, D - диафрагма, Bs - делительный кубик, L - линза, Lmf - маломодовое волокно ( $V=3.4$ ), Pr - призма, CCD - камера

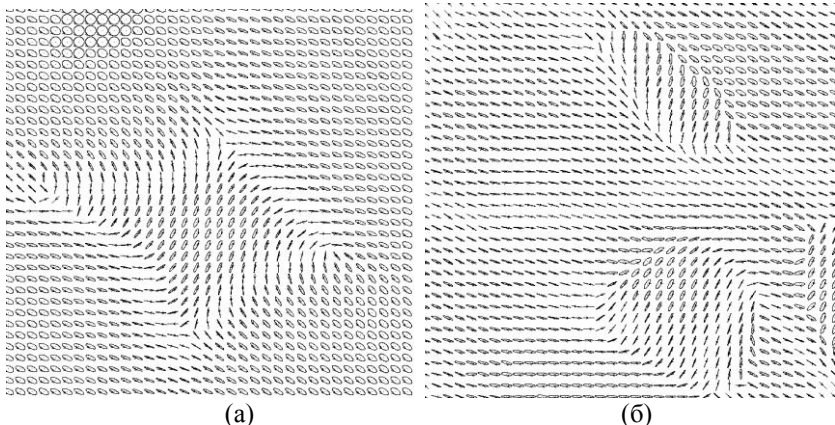


Рис. 2. Картины распределения поляризации: для пучка света с длиной волны  $\lambda_1=0.6328$  мкм (а), для пучка света с длиной волны  $\lambda_2=0.532$  мкм (б)

Картины распределения поляризации приведены на рис. 2. Анализ полученных картин позволяет идентифицировать каждый из пучков с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  и по модовому составу.



Ю.В. ЗАЧИНЯЕВ, С.А. ПЛИВАК, А.С. ШУМИЛИН

*Южный федеральный университет, Таганрог*

## **ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ФАЗОВОЙ САМОМОДУЛЯЦИИ**

Рассмотрен подход к увеличению девиации частоты сигналов с линейной частотной модуляцией на основе явления нелинейной оптики – фазовой самомодуляции.

Yu.V. ZACHINYAEV, S.A. PLIVAK, A.S. SHUMILIN

*Southern Federal University, Taganrog*

## **SELF-PHASE MODULATION BASED CHIRP GENERATION**

An approach based on the phenomena of non-linear optics – self-phase modulation – to increase the chirp frequency deviation is discussed.

Одним из направлений совершенствования аппаратуры формирования сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) является увеличение девиации частоты формируемого сигнала. Решением данной задачи видится использование волоконно-оптической элементной базы для высокоскоростного формирования и обработки широкополосных радиосигналов.

В качестве альтернативного подхода к формированию ЛЧМ-сигналов на основе волоконно-оптической элементной базы предлагается метод, основанный на фазовой самомодуляции (ФСМ) – явлении нелинейной оптики, которое определяется зависимостью показателя преломления в оптическом волокне от интенсивности оптического сигнала при распространении импульса света по волокну. Из-за нелинейности показателя преломления различные участки импульса испытывают разный дополнительный фазовый набег, что приводит к частотной модуляции и уширению спектра импульса [1].

Структура устройства, реализующего подход, приведена на рис. 1.

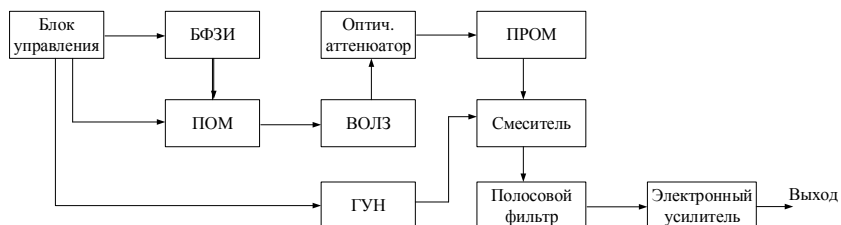


Рис. 1. Структурная схема формирователя ЛЧМ-сигналов на основе явления ФСМ

Передающий оптический модуль (ПОМ) генерирует оптический импульс гауссовской формы и высокой пиковой мощностью, которая задается блоком формирования задающих импульсов (БФЗИ) и управляется блоком управления. При прохождении через волоконно-оптическую линию задержки (ВОЛЗ) импульс под воздействием ФСМ преобразуется в ЛЧМ-сигнал, стабилизируется по мощности в оптическом аттенуаторе. В приемном оптическом модуле оптический сигнал преобразуется в электрический. Генератор, управляемый напряжением (ГУН) и смеситель осуществляют регулировку центральной частоты ЛЧМ-сигнала. Полосовой фильтр позволяет устранить побочные продукты преобразования частоты.

В [2] показано, что девиация частоты, достижимая на основе формирователя на ФСМ, ограничивается лишь техническими характеристиками ПРОМ и полосового фильтра (20-30 ГГц для серийных изделий) при длительности сигнала от 50 пс при уровне боковых лепестков автокорреляционной функции минус 13,4 дБ.

#### *Список литературы*

1. Агравал Г.П. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.
2. Зачиняев Ю.В., Румянцев К.Е. Формирование радиосигналов с линейной частотной модуляцией с использованием фазовой самомодуляции // ES-T-ФМ-2015-011. Технические и естественные науки: теория и практика. Сборник материалов международного научного симпозиума, Москва, 2015. С.47-58.

А.О. ПОГРЕБНАЯ, А.Ф. РЫБАСЬ

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь*

## **ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ПУЧКА ПЕРЕНОСЯЩЕГО ОПТИЧЕСКИЙ ВИХРЬ С ДРОБНЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ В ОДНООСНОМ КРИСТАЛЛЕ**

Показана динамика фазовой структуры пучка переносящего оптический вихрь с дробным топологическим зарядом  $\frac{1}{2}$  в одноосном кристалле. С увеличением угла наклона пучка относительно оптической оси кристалла, характерная сдвигка - смешанная дислокация волнового фронта, перемещается в интерференционной картине в область периферии пучка. Достигнув значения угла  $\alpha=2^\circ$ , мы наблюдаем в фазовой картине, появление «вилки», т.е. оптического вихря с целым порядком топологического заряда, равным 1.

A.O. POGREBNAYA, A.F. RUBASS

*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol*

## **PHASE STRUCTURE OF THE BEAM TRANSFERRING THE OPTICAL VORTEX WITH THE FRACTIONAL TOPOLOGICAL CHARGE IN THE UNIAXIAL CRYSTAL**

Shows the evolution of phase structure of the beam transferring the optical vortex with the fractional topological charge  $\frac{1}{2}$  in a uniaxial crystal. With the increase in the angle of the beam relative to the optical axis of the crystal, characteristic slight shift - mixed dislocation wave front moves in the interference pattern to the periphery of the beam. Upon reaching the angle  $\alpha=2^\circ$ , we observe in the distribution phase, the emergence of "fork", i.e. optical vortex with a topological charge of the order of 1.

Для создания устройств захвата и транспортировки микрочастиц, используются специфические профили сингулярных пучков. Особенно интересны сейчас пучки, переносящие оптические вихри с дробными топологическими зарядами. Показана возможность генерации оптических вихрей с дробными топологическими зарядами на краю диэлектрического клина. Исследование проводилось на экспериментальной установке, показанной на рис. 1.

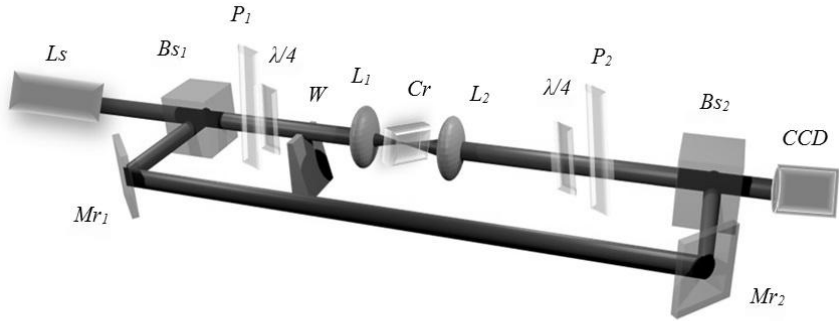


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: Ls - лазер, Bs - делительный кубик, P - поляризатор,  $\lambda/4$  - четвертьволновая пластина, W - диэлектрический клин, L - линза, Cr - одноосный кристалл LiNbO<sub>3</sub>, Mr - зеркало, CCD - камера

Экспериментально получены фазовые портреты пучка, переносящего оптический вихрь с дробным топологическим зарядом в одноосном кристалле (рис. 2).

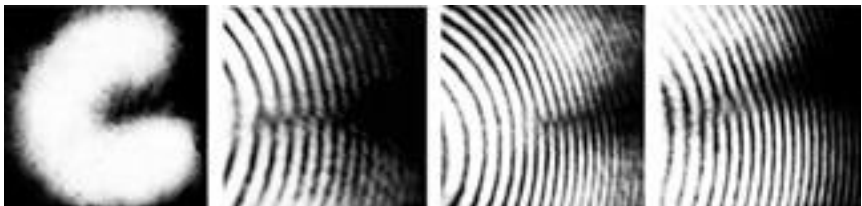


Рис. 2. Интенсивность и динамика фазовой структуры пучка переносящего оптический вихрь с дробным топологическим зарядом  $\frac{1}{2}$  в одноосном кристалле

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАДИОФОТОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛА,  
ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ РАСТЯЖЕНИЕ СИГНАЛА  
ПО ВРЕМЕНИ**

В работе представлены результаты математического моделирования процесса растяжения сигнала за счёт дисперсии групповой скорости.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

**MATHEMATICAL MODELLING OF MICROWAVE  
PHOTONIC TIME-STRETCH SYSTEM**

In this paper results of mathematical modeling of stretching of a signal due to dispersion of group velocity are presented.

Целью данной работы является моделирование системы обработки сигналов, основанной на процессе растяжения сигнала по времени за счёт дисперсии групповой скорости в оптоволокне. На основе такого принципа возможно построение различных систем обработки информации, в частности аналого-цифровых преобразователей, что является перспективной и практически важной задачей [1-4]. В этом случае применение растяжения сигнала обеспечивает снижение требований к скорости проведения дискретизации, что позволяет построить «быстрый» аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на основе имеющихся «медленных», то есть сделать возможным выполнение преобразования коротких и/или быстрых сигналов с использованием АЦП с малой частотой выборки.

Принцип действия системы с оптическим растяжением иллюстрируется рис. 1. Суперконтинуум генерирует широкополосный оптический импульс, который при прохождении первой диспергирующей среды растягивается так, что его спектральные компоненты следуют друг за другом. Далее полученный оптический ЛЧМ-импульс модулируется по интенсивности входным радиосигналом при помощи модулятора света (как правило используется модулятор Маха-Цандера). Проходя вторую диспергирующую среду сигнал растягивается по времени с

коэффициентом растяжения, определяющимся отношением дисперсии 1й и 2й диспергирующих сред:  $M=1+D_2/D_1$ . Растянутый сигнал принимается на фотодиоде и обрабатывается АЦП.

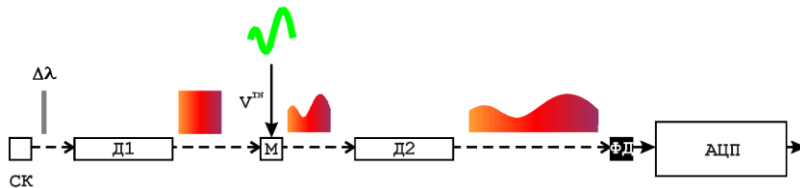


Рис. 1. Схема обработки сигналов в радиофотонной системе измерения с оптическим растяжением: СК – суперконтинуум, Д1 - оптоволоконно с дисперсией, М – модулятор, Д2 - оптоволоконно с дисперсией, ФД – фотодиод, АЦП - аналого-цифровой преобразователь

Для моделирования системы создано программное обеспечение, реализующее математические модели её элементов для которых были введены различные варьируемые параметры, в том числе:

- ширина спектра суперконтинуума
- шумы суперконтинуума
- дисперсионные характеристики волоконных элементов,
- модуляционная характеристика модулятора,
- АЧХ модулятора,
- чувствительность фотодетектора,
- АЧХ фотодетектора,
- шумы фотодетектора,
- эффективное число бит АЦП.

В качестве рабочего оптического диапазона выбран стандартный 1,5 мкм диапазон. Учёт перечисленных параметров позволяет показать их влияние на отношение сигнал/шум на выходе рассматриваемой системы, а значит охарактеризовать выполняемое ей аналого-цифровое преобразование.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 14-29-08174.

#### Список литературы

1. Caputi W. Stretch: a time-transformation technique // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1971. V.AES-7. P.269-278.
2. Valley G. Photonic analog-to-digital converters // Opt. Express. 2007. V.15. P.1955-1982.
3. Fard A., Gupta S., Jalali B. Photonic time-stretch digitizer and its extension to real-time spectroscopy and imaging // Laser Photon. Rev. 2013. V.7. P.207-263.
4. Стариков П.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. №2. С.3-39.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск*

## **МЕЗОФОТОНИКА ИЗОЛИРОВАННЫХ И КЛАСТЕРА САМОПОДОБНЫХ ТРЕХМЕРНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ**

Работа посвящена краткому обзору нового и альтернативного известным подхода к разработке мезоразмерных систем локализации и транспортировки электромагнитного поля в субволновую область на основе мезоразмерных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы. Этот подход состоит в замене гальванических информационных каналов (металлических структурных компонентов) фотонными на основе материалов с небольшим положительным значением диэлектрической проницаемости и воздушных промежутков.

I.V. MININ, O.V. MININ

*Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk*

## **MESOPHOTONICS OF ISOLATED AND CLUSTER OF SELF-SIMILAR THREE-DIMENSIONAL DIELECTRIC PARTICLES**

The paper is devoted to a brief overview of the new and alternative known approach to the development of mesoscale systems for localization and transport of electromagnetic fields to the subwavelength region based on mesoscale dielectric particles of arbitrary three-dimensional shape. This approach is to replace the electroplating of information channels (metallic structural components) to photonic based on materials with small positive value of dielectric constant, and the air gaps.

Как известно, обычно приемной наноантенной принято называть устройство, способное эффективно преобразовывать падающее излучение (в оптическом диапазоне) в сильно локализованное эванесцентное поле [1], которое сконцентрировано в трехмерной области малого размера (по сравнению с классическим дифракционным пределом). Субдифракционная локализация электромагнитного поля является одним из важных свойств трехмерных диэлектрических структур [2], в том числе как формирующих т.н. фотонные струи [3], так и структур с фотонными запрещенными зонами [4].

Важной проблемой, которую должны решить оптические мезо- и нано-системы, является организация беспроводной системы передачи данных в

составе оптического чипа. Создание таких полностью оптических чипов является одной из основных задач нанофотоники [5]. Использование в таких системах классических плазмонных волноводных структур вряд ли возможно из-за быстрой диссипацией энергии плазмонной волны. Предлагаемый подход к созданию мезо- и нано- антенн позволяет передавать оптические сигналы между различными частями оптических чипов по пустому пространству [6] и поэтому практически устраняют указанный недостаток.



Рис. 1. Пример двухчастичного кластера самоподобных кубических элементов, формирующих фотонную струю с субволновым размером области фокусировки

Например, такие системы на основе кубической (Рис.1) или другой, в общем случае произвольной трехмерной мезоразмерной формы, выполнены из диэлектрика с небольшим показателем преломления в отличие от металлических плазмонных или полупроводниковых элементов, обладают повышенной эффективностью, поскольку потери на нагрев и рассеяние существенно меньше, а кубические структуры проще в изготовлении [7]. Расстояние между кубами позволяет с высокой точностью управлять канализацией излучения в различных задачах и придают направленность любым ненаправленным точечным источникам.

#### *Список литературы*

1. Novotny L., Hulst N. Antennas for light // Nature Photonics. 2011. V.5. P.83–90.
2. Minin I.V., Minin O.V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit. Springer, 2015.
3. Минин И.В., Минин О.В. // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2014. Т.12. Вып.4. С.59-70.
4. Minin I.V., Minin O.V. Effect of EM strong localization in photonic crystal // Proc. of 3 Int. conf. “Photonics of nano- and micro- structures”, Tomsk, 2015.
5. Progress in Nanophotonics 1 / ed by M. Ohtsu. Springer, 2011.
6. Minin I.V., Minin O.V., Pacheco-Peña V., Beruete M. All-dielectric periodic terajet waveguide using an array of coupled cuboids // Appl. Phys. Lett. 2015. V.106. P.254102.
7. Minin I.V., Minin O.V. Photonics of mesoscale nonspherical and non axisymmetrical dielectric particles and application to cuboid-chain with air-gaps waveguide based on periodic terajet-induced modes (Invited) // Proc. of the 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Budapest, Hungary, 2015.



С.В. ВАСИЛЬЕВ, Н.В. ЖАРКИЙ, А.Ю. ИВАНОВ

*Гродненский государственный университет им.Я. Купалы, Беларусь*

## **ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ДИНАМИКИ РОСТА КРАТЕРА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ**

Показано, что зарегистрировав дифракционную картину, возникающую при падении СВЧ излучения на поверхность твердого тела и добившись в ходе эксперимента наилучшего совпадения данных эксперимента и расчета с использованием компьютерной модели, можно определить характер рельефа зоны деформаций на поверхности обрабатываемой структуры.

A.Yu. IVANOV, S.V. VASIL'EV, N.V. ZHARKIY

*Grodno State University named after Ya. Kupala, Belarus*

## **EXPRESS-DIAGNOSTICS OF CRATER GROWTH DYNAMICS ON LASER TREATING OF MATERIALS**

It is shown o that having detected a diffraction picture appearing on incidence of SHF-radiation on the surface of solid and having achieved during the experiment the best coincidence of the experimental and calculated using the computer model data one can define the character of the zone of destruction on the surface of structure being under treatment relief.

Данная работа посвящена исследованию возможности определения геометрических параметров зоны разрушения в реальном масштабе времени. Изучение данного вопроса необходимо как для выбора наиболее эффективных режимов лазерно-плазменной обработки материалов, так и для создания новых, более современных методов диагностики и контроля за ходом лазерной обработки материалов.

Моделирование реализовывались в программном пакете CST Microwave Studio – система моделирования СВЧ устройств, в основе которой лежат метод аппроксимации и метод определенных интегралов во временной области [1]. Были получены дифракционные картины от моделей структур с различной периодичностью диэлектрической проницаемости, включая периодические структуры с некоторыми видами нарушениями периодичности и дефектами (рис. 1). Параметры структуры, приведенной на рис. 1, выглядят следующим образом: прямоугольные диэлектрики размером 1x1x9 мм и количеством 9x9, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_1=100$ ,  $\epsilon_2=200$ ,  $\epsilon_3=300$ . Диаграммы направленности

(рис. 2) получены в СВЧ диапазоне при частоте  $f = 10.0$  ГГц. Для структур были также получены спектры пропускания волн СВЧ диапазона, которые также носят различный характер.

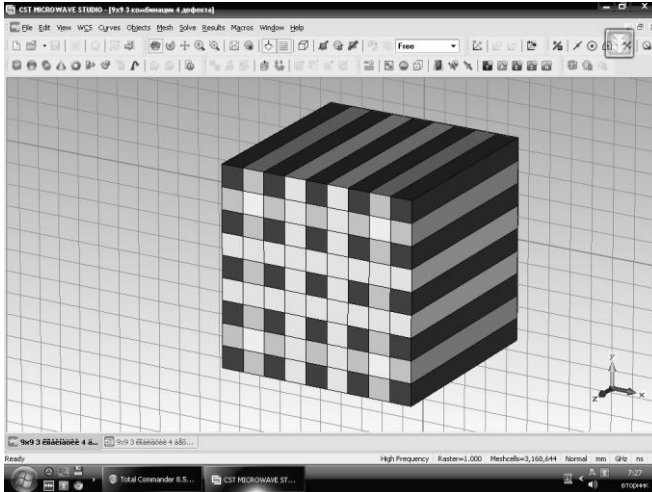


Рис. 1. Пример компьютерной модели в продукте CST Microwave Studio

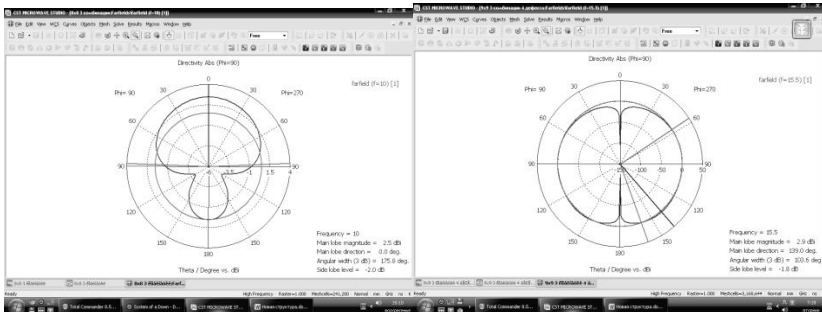


Рис. 2. Диаграммы направленности структур при частоте  $f = 10.0$  ГГц

#### Список литературы

1. CST Studio Suite 2009. Workflow&Solver Overview. [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.cst.com>. – Дата доступа: 07.09.2014.

А.П. БОЙЧЕНКО, С.Ю. СЕВРЮКОВ, Д.С. ОВЕЧЕНКО  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

**О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ МЯГКОГО  
РЕНТГЕНОВСКОГО И ВАКУУМНОГО  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЙ БАРЬЕРНЫМ  
РАЗРЯДОМ ЗА СЧЕТ ЭФФЕКТА УБЕГАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ**

На примере воздушной поры радиусом  $5 \cdot 10^{-4}$  м в полиэтиленовой изоляции коаксиального кабеля высоковольтного напряжения проведены теоретические оценки возможности генерации барьерным газовым разрядом мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения в режиме «убегания» электронов. Показано, что, начиная с некоторой критической напряженности электрического поля  $4 \cdot 10^7$  В/м, при котором вероятен этот режим, возможна генерация электромагнитного излучения с длиной волны менее 33 нм.

A.P. BOYCHENKO, S.Yu. SEVRYUKOV, D.S. OVECHENKO  
*Kuban State University, Krasnodar*

**ABOUT POSSIBILITY OF GENERATION THE SOFT X-RAYS  
AND THE VACUUM UV- RAYS FROM BARRIER DISCHARGE  
BY EFFECT ELECTRONS RUNAWAY**

For example, the air pore radius of  $5 \cdot 10^{-4}$  m in polyethylene insulation of high-voltage coaxial cable made theoretical estimates of the possible generation from barrier gas discharge soft X-ray and vacuum ultraviolet radiation in the «runaway» electrons. It is shown that, starting from some of the critical electric field  $4 \cdot 10^7$  V/m, when it is probable mode is possible to generate electromagnetic radiation with a wavelength of less than 33 nm.

Обнаруженное в барьерном газовом разряде (БГР) мягкое рентгеновское излучение (РИ) существенно расширило область его использования, позволив привлечь БГР в качестве радиационно-сшивающего агента для полимеров, а также индикатора локализации газовых пор в полимерной изоляции электрических кабелей высокого напряжения [1]. Однако, специальных теоретических оценок спектрального диапазона электромагнитного излучения БГР в рентгеновской и вакуумной ультрафиолетовой (УФ) областях не проводилось. Настоящая статья посвящена качественным результатам таких оценок на основе эффекта «убегающих» электронов (УЭ) [2, 3] при

возбуждении разряда переменным напряжением частотой 50 Hz в газовой поре полиэтиленовой изоляции с воздухом атмосферного давления.

Критерием возникновения УЭ может служить критическая напряженность электрического поля  $E = 4 \cdot 10^{-18} N$  [3], при которой набираемая электронами энергия  $W$  превысит теряемую при столкновении с молекулами и/или атомами газа концентрацией  $N \approx 10^{25} \text{ m}^{-3}$ . При длине их свободного пробега в воздухе около  $10^{-6} \text{ m}$ ,  $W$  составит  $6,05 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ , что соответствует длине волны излучения  $\lambda = hcW^{-1} \approx 33 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  (где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света в вакууме). Оно относится к жесткому УФ излучению, граничащему с мягким РИ, которое охватывает спектральный диапазон  $(0,3-10) \cdot 10^{-9} \text{ m}$ . Из чего следует, что для генерации длинноволновой ( $\lambda = 10^{-8} \text{ m}$ ) компоненты последнего в воздухе атмосферного давления потребуются поля  $E \gg 4 \cdot 10^7 \text{ V/m}$ , т.е. обеспечивающие электронам  $W \approx 2 \cdot 10^{-17} \text{ J}$ , что соответствует  $E \approx 10^8 \text{ V/m}$ . Таким образом для воздушной поры радиусом  $r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$  в полиэтиленовой изоляции коаксиального кабеля высоковольтного напряжения, имеющего радиусы токопроводящей жилы  $R_1 = 0,014 \text{ m}$  и внешней заземленной  $R_2 = 0,022 \text{ m}$ , можно определить необходимую разность потенциалов  $U$  для создания требуемой  $E$  в поре:  $U = 2Er \cdot \ln(R_2 R_1^{-1}) \cdot (3k)^{-1}$ , где  $k = 0,412$  – коэффициент неоднородности поля для газового включения сферической формы, рассчитанного по известным электро-геометрическим параметрам воздуха и полиэтилена [4, 5] при частоте 50 Hz. Оценки показывают, что для генерации фотонов с  $\lambda = (33-10) \cdot 10^{-9} \text{ m}$  необходимо приложить к рассмотренному кабелю  $U$  от 15 до 37 kV, что согласуется с данными [1] по регистрации УФ и РИ, указывая на возможную причину их возникновения за счет эффекта УЭ.

#### *Список литературы*

1. Новиков Г.К. Плазмозфизические электротехнологии модификации полиолефиновой кабельной изоляции. Иркутск: ИрГУ, 2007.
2. Гуревич А.В., Зыбин К.П. Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы // УФН. 2001. Т.171. №11. С.1177–1199.
3. Бойченко А.М., Ткачев А.Н. Граница раздела областей дрейфа и убегания электронов вне границы области существования таунсендовского разряда // ЖТФ. 2014. Т.84. Вып.9. С.74–77.
4. Джуварлы Ч.М., Вечхайзер Г.В., Штейншрайбер В.Я. Поле в сферическом и цилиндрическом включениях в диэлектрике при учете поверхностной проводимости // Электронная обработка материалов. 1969. №6. С.37–42.
5. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 4-е изд. СПб: Химия, 1994.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ

*Ульяновский государственный университет***МОДУЛЯЦИОННАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В СРЕДЕ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Исследованы условия возникновения, область существования, и другие характеристики модуляционной неустойчивости волновых пакетов, распространяющихся в нелинейной среде с бегущей волной показателя преломления. Получены зависимости интегрального инкремента усиления от частоты отстройки при различных параметрах среды и БВП.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV

*Ulyanovsk State University***MODULATION INSTABILITY OF WAVE PACKETS IN MEDIUM WITH A RUNNING REFRACTIVE INDEX WAVE**

The conditions of occurrence, the region of existence, and other characteristics of the modulation instability of wave packets propagating in a nonlinear medium with a running refractive index wave are researched. The dependences of the integral gain increment of the frequency detuning for various parameters of the medium and BVPP are received.

Модуляционная неустойчивость (МН) – рост малых гармонических возмущений непрерывной волны – эффект, характерный для многих нелинейных систем, поддерживающих распространение локализованных волн, природа которого связана с совместным действием нелинейных и дисперсионных эффектов [1].

Для волнового пакета, распространяющегося в соответствующей среде с групповой скоростью, которая равна скорости перемещения БВП можно преобразовать уравнение для амплитуды огибающей волнового пакета к виду [2, 3, 4]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \bar{A} - if^2 z D \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \bar{A} + if(z) R |\bar{A}|^2 \bar{A} = 0 \quad (1)$$

где  $\tau = t - \frac{\partial \beta}{\partial \omega} z$  – время в бегущей системе координат,  $\beta = n_0 \omega / c$  – постоянная распространения волнового пакета в световоде, функция

$f z$  – функция, определяемая глубиной и частотой модуляции волновода.

На рис. 1 представлены зависимости интегрального инкремента усиления ВП, распространяющегося в среде с БВПП длиной  $L=1$  м, полученный для мощности импульса  $P_0=1$  Вт, постоянной распространения волнового пакета в световоде с реализуемой БВПП  $\beta=10^7 \text{ м}^{-1}$ , дисперсии групповых скоростей  $|D|=1; 2 \cdot 10^{-26} \text{ с}^2/\text{м}$  – кривые (1,3;2,4), при коэффициентах модуляции  $m=10^{-3}$ , частоте БВПП  $\Omega=5 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , параметре нелинейности  $R=1; 2 \text{ (Вт}\cdot\text{м)}^{-1}$  – кривые (1,2;3,4). Видно, что с ростом параметра нелинейности увеличивается как частотная область существования МН так и максимальное значение инкремента усиления, при этом с ростом дисперсии уменьшается частотная область существования дисперсии, но растет максимум интегрального инкремента усиления.

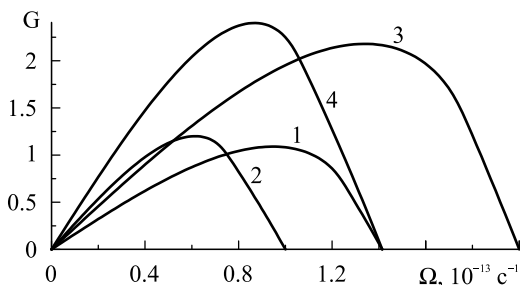


Рис. 1. Интегральный инкремент усиления при различных значениях  $|D|=1; 2 \cdot 10^{-26} \text{ с}^2/\text{м}$  – кривые (1,3;2,4) и  $R=1; 2 \text{ (Вт}\cdot\text{м)}^{-1}$  – кривые (1,2;3,4)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках Государственного задания и проекта № 14.Z50.31.0015).

*Список литературы*

1. Agrawal G. Nonlinear fiber optics. Springer, 2007.
2. Торчигин В.П. // Квантовая электроника. 1995. Т.22. №5. С.509.
3. Kolner В.Н. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 1994. V.30. №8. P.1951.
4. Ахманов С.А., Выслух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. М: Наука. 1988.

В.А. ЛИТВИНОВА, М.Н. ЛИТВИНОВА, Ю.М. КАРПЕЦ  
*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В ЛЕГИРОВАННЫХ ВОЛОКНАХ С ПЕРИОДИЧЕСКИ НАВЕДЕННОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ**

В работе рассчитана эффективность генерации второй гармоники для оптических волокон с решеткой квадратичной нелинейности, изготовленных из кварцевого стекла с легирующими добавками окиси германия  $\text{GeO}_2$ , фосфора  $\text{P}_2\text{O}_3$ , бора  $\text{B}_2\text{O}_3$ , натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  и фтора F.

V.A. LITVINOVA, M.N. LITVINOVA, Yu.M. KARPETZ  
*Far eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **SECOND HARMONIC GENERATION IN DOPED AND PERIODICALLY POLED SILICA FIBERS**

In paper the efficiency of second harmonic generation were calculated for the periodically poled quartz fibers doped with  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ , F.

Одной из задач нелинейной оптики является создание эффективных преобразователей частоты оптического излучения. Нелинейно-оптическое преобразование частоты излучения в диапазоне длин волн 0.8 – 1.8 мкм может быть осуществлено с использованием оптических волокон, изготовленных из кварцевого стекла с легирующими добавками, изменяющими показатель преломления кварца без ухудшения его оптических свойств.

Эффективная генерация второй гармоники в стекле возможна в результате оптического наведения или записи пространственно-периодической квадратичной нелинейности ( $\chi^{(2)}$ -решетки) [1, 2].

Симметрия кварцевого стекла может быть нарушена путем наведения анизотропии методом теплового полинга [3]. При этом внутри кварцевого волокна создается постоянное электрическое поле, которое приводит к возникновению квадратичной нелинейности.

Для повышения эффективности генерации второй гармоники необходимо фазовое согласование излучения накачки и второй гармоники, что достигается путем формирования пространственно-периодической квадратичной нелинейности. При этом период  $\Lambda$

структуры и длина волокна  $l$  определяют диапазон длин волн, в котором выполняется условие квазисинхронизма [4, 5].

В работе проведены расчеты эффективности генерации второй гармоники для полингованных волокон с решеткой квадратичной нелинейности, изготовленных из кварцевого стекла с легирующими добавками окиси германия  $\text{GeO}_2$ , фосфора  $\text{P}_2\text{O}_5$ , бора  $\text{B}_2\text{O}_3$ , натрия  $\text{Na}_2\text{O}$  и фтора F. На рис. 1 представлена зависимость эффективности генерации второй гармоники от длины волокна.

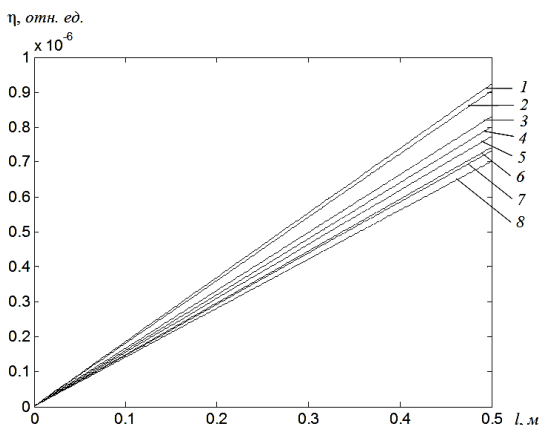


Рис. 1. Зависимость эффективности генерации второй гармоники от длины волокна с различными примесями: 1 – 7 мол.%  $\text{GeO}_2$ ,  $\Lambda = 85,36$  мкм; 2 – 13,5 мол.%  $\text{GeO}_2$ ,  $\Lambda = 84,50$  мкм; 3 – 1% F,  $\Lambda = 80,94$  мкм; 4 – 20 мол.%  $\text{GeO}_2$ ,  $\Lambda = 79,53$  мкм; 5 – 3,5 мол.%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\Lambda = 78,21$  мкм; 6 – 9,1 мол.%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\Lambda = 76,59$  мкм; 7 – 3,3 мол.%  $\text{GeO}_2$  и 9,2 мол.%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\Lambda = 76,05$  мкм; 8 – 3 мол.%  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\Lambda = 74,38$  мкм;  $\Lambda$  – период решетки квадратичной нелинейности для длины волн излучения  $\lambda = 1541$  нм

#### Список литературы

1. Österberg U., Margulis W. Dye laser pumped by Nd:YAG laser pulses frequency doubled in a glass optical fiber // Optics Letters. 1986. V.11. Is.8. P.516-518.
2. Stolen R.H., Tom H.W.K. Self-organized phase-matched harmonic generation in optical fibers // Optics Letters. 1987. V.12. No.8. P.585-587.
3. Myers R.A., Mukherjee N., Brueck S.R.J. Large second-order nonlinearity in poled fused silica // Optics Letters. 1991. V.16 Is.22. P.1732-1734.
4. Zhang J., Qian L.  $\chi^{(2)}$  evolution in fiber during prolonged thermal poling // Coherent Optical Technologies and Applications. 2008. P.CMC6.
5. Canagasabay A., Corbari C., Gladyshev A.V., et. al. High-average-power second-harmonic generation from periodically poled silica fibers // Optics Letters. 2009. V.34 (16). P.2483-2485.



А.И. ИЛЛАРИОНОВ, М.С. ИВАНОВ, О.В. ГОРЕВА

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИЕЙ, НА СТРУКТУРУ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ**

Приводятся результаты исследования зависимости параметров структуры второй оптической гармоники (ВОГ) от различных характеристик фокусирующей системы, обладающей сферической aberrацией. Установлены основные закономерности переноса информации о величине сферической aberrации в структурах второй оптической гармоники с учётом геометрии фокусирующей системы.

A.I. ILLARIONOV, M.S. IVANOV, O.V. GOREVA

*Irkutsk State Transport University*

## **INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE OPTICAL SYSTEM HAVING THE SPHERICAL ABERRATION ON THE STRUCTURE OF THE OPTICAL SECOND HARMONIC**

The report presents the results of the study of structural parameters based optical second harmonic (VOG) from the different characteristics of the focusing system with spherical aberration. The basic laws of information transfer on the value of the spherical aberration in the optical second harmonic structures, taking into account the geometry of the focusing system.

Любая отцентрированная оптическая система обладает, в основном, сферической aberrацией [1]. Так как полностью избавиться от aberrаций невозможно, то их необходимо учитывать при обработке получаемой приемником информации, что затруднено при работе в инфракрасной (ИК) области спектра. Решение данной проблемы можно найти при исследовании влияния формы и геометрии оптических систем фокусировки с учётом их aberrаций на преобразованное по частоте излучение в нелинейно-оптических кристаллах (НОК).

При преобразовании ИК излучения в видимую область спектра свойства оптической системы, не лишённой aberrаций и фокусирующей основное излучение в НОК, отображаются в структуре преобразованного излучения. Первые исследования по влиянию aberrаций фокусирующей

оптической системы на пространственно-угловую структуру преобразованного по частоте излучения, в частности на структуру ВОГ, были рассмотрены в работах [2,3]. В данных работах была исследована пространственно-угловая структура ВОГ при накачке излучением неодимого лазера ( $\lambda=1,064$  мкм), сфокусированного плоско-выпуклой линзой, неисправленной от сферической аберрации в кристаллах иодата, ниобата и формиата лития. В работе [4] проанализировано влияние свойств кристаллов-преобразователей на пространственную структуру ВОГ при фокусировке излучения линзой, используемой в работах [2, 3]. В приведённых работах не был раскрыт механизм влияния формы и геометрии фокусирующей системы на пространственно-угловую структуру преобразованного излучения.

Исследования влияния формы фокусирующей линзы проведено авторами работы [5], в которой использовалась для фокусировки ИК излучения в НОК выпукло-плоская линза. Было установлено, что форма фокусировки излучения влияет на угловые параметры пространственно – угловой структуры, сохраняя при этом вид кривых самой структуры.

В данной работе приводятся результаты исследования эволюции структуры ВОГ в зависимости от различных параметров фокусирующей системы, обладающей сферической аберрацией, установлены основные закономерности переноса информации о величине аберрации в структуры ВОГ. Создана методика определения величины сферической аберрации (продольной и поперечной). Разработан алгоритм программы для экспериментального определения величины аберраций фокусирующих линз в ИК области спектра, где нет доступных и эффективных методик оценки данного рода ошибок. Приводятся результаты исследования методами компьютерного моделирования пространственно-угловых и энергетических структур основного излучения и ВОГ с учётом влияния формы и геометрии фокусирующей линзы.

#### *Список литературы*

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Stroganov V.I., Illarionov A.I. // Opt.Com. 1980. V.35. №3. P.454-461.
3. Строганов В.И., Илларионов А.И. // Журнал прикладной спектроскопии. 1981. Т.34. С.233-237.
4. Илларионов А.И., Янчук О.В. Известия высших учебных заведений. Физика. 2007. Т.50. №12. С.14-19.
5. Илларионов А.И., Иванов М.С. Ученые записки ЗабГГПУ им. Н.Г. Чернышевского. Серия «Естественные науки. Физика». 2011. Т.38. №3. С.93-98.

В.И. ИВАНОВ, Г.Д. ИВАНОВА, В.К. ХЕ

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск*

## **СВЕТОИНДУЦИРОВАННАЯ ПСЕВДОПРИЗМА В НАНОСУСПЕНЗИИ**

Метод светоиндуцированной псевдопризмы используется для исследования нелинейных сред и оптической диагностики материалов. В данной работе предлагается способ создания псевдопризмы в нанодисперсной жидкофазной среде за счет светового давления опорного излучения. В результате аналитического решения задачи светоиндуцированного массопереноса получено выражение для угла отклонения луча в псевдопризме.

V.I. IVANOV, G.D. IVANOVA, V.K. KHE

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk*

## **THE LIGHT INDUCED PSEUDOPRISM IN NANOSUSPENSION**

The light induced pseudo-prism method is used to study nonlinear media and for optical diagnostics of materials. This paper proposes a way to create pseudo-prisms in the nanosuspension through the light radiation pressure. As a result of the analytical solution of the light induced mass transport task it was obtained an expression for the deflection angle of the beam in a pseudo-prism.

В термооптической спектроскопии широко используется нелинейно-оптические методы диагностики материалов, основанные на различных механизмах светоиндуцированной модуляции оптических констант среды [1]. В одном из методов в качестве измеряемого сигнала используют угол отклонения сигнального луча в слое среды с градиентом показателя преломления (метод псевдопризмы). В частности, термоиндуцированная псевдопризма в наносuspензии использовалась для исследования термодиффузии наночастиц [2].

Рассмотрим жидкофазную среду с наночастицами (дисперсная фаза), находящуюся под воздействием опорного лазерного излучения с равномерным профилем интенсивности  $I_0$  (рис. 1). Под действием сил светового давления в кювете создается градиент концентрации частиц и, соответственно, показателя преломления. Сигнальный луч  $I_s$  распространяется перпендикулярно опорному и отклоняется в образованной псевдопризме на угол  $\theta_s$ .

На наночастицу действует сила светового давления:

$$F_P = \frac{128\pi^5 a^6}{3c\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) n_1 I_S, \quad (1)$$

где  $I_S$  - интенсивность света,  $m = n_2 / n_1$ ;  $n_1, n_2$  - показатели преломления дисперсионной среды и дисперсной фазы соответственно. Скорость частицы  $V = \mu F_P$ , где  $\mu = 6\pi\eta a^{-1}$  - коэффициент подвижности частиц,  $\eta$  - вязкость жидкости,  $a$  - радиус частицы,  $\lambda$  - длина волны излучения,  $c$  - скорость света.

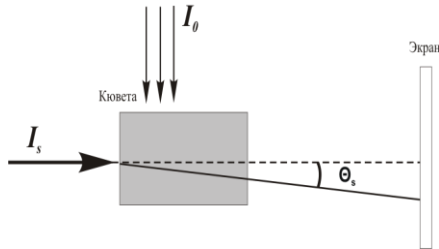


Рис. 1. Оптическая схема псевдопризмы

Балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц в жидкофазной среде с учётом диффузии [1]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\text{div} -D\nabla C + VC, \quad (2)$$

где  $C(r, t)$  - объемная концентрация дисперсных частиц,  $D$  - коэффициент диффузии. Для расчета угла отклонения луча используем выражение [2]:

$$\theta_s = \frac{d}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial C} \right) \left( \frac{\partial C}{\partial z} \right). \quad (3)$$

В случае стационарного режима ( $\partial C / \partial t = 0$ ) и малого изменения концентрации имеем:

$$\theta_s, t \rightarrow \infty = 4\pi a^3 C_0 d \mu F_P (n_2 - n_1) D^{-1} n_1^{-1} / 3, \quad (4)$$

где  $d$  - длина кюветы. Полученное выражение можно использовать для оптической диагностики наносупензий методом псевдопризмы.

#### Список литературы

1. Иванов В.И., Иванова Г.Д., Хе В.К. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. Вып.5. С.112-115.
2. Buzzaccaro S., et. al. // Journal of Physics: Condensed Matter. 2008. V.20. №49. P.494219.

**С.В. ИВАНОВА**

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

## **РАССЕЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМ КРИСТАЛЛОМ В ДАЛЬНОМ ПОЛЕ**

Проведено исследование образования и эволюции картин рассеяния лазерного луча, прошедшего через нелинейный кристалл с несоизмеримой структурой. Анализ результатов проведен с учетом структурных данных. Картины распределения интенсивности рассеяния на экране в дальнем поле представлены набором полос, кругов и эллипсов в зависимости от температуры и направления луча относительно кристаллографических осей.

**S.V. IVANOVA**

*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

## **SCATTERING OF LASER LIGHT BY NONLINEAR CRYSTAL IN FAR-FIELD**

It was studied the formation and the evolution of the far-field patterns of the laser beam passing through the nonlinear crystal with incommensurate structure taking into consideration of the structural investigations. Results show that the far-field intensity distribution of patterns is a series of rings, stripes and ellipses in dependence on the temperature and direction of the laser beam relatively of the crystallographic axes.

В работе представлены результаты температурных исследований рассеянного в дальнем поле кристаллом барий натриевого ниобата излучения в широкой температурной области (20-600°C) при разных направлениях луча относительно кристаллографических осей. Кристалл имеет высокие нелинейно-оптические коэффициенты и сложную последовательность фазовых превращений при изменении температуры: два структурных фазовых перехода – сегнетоэлектрический при температуре 560°C в тетрагональную фазу и сегнетоэластический вблизи температуры 300°C в орторомбическую несоизмеримую фазу [1-4]. В работе [2] методом электронной микроскопии исследовалась эволюция доменной структуры и определены размеры доменов. В работах [1-3] были обнаружены несоизмеримые фазы ниже 300°C. В работе [4] при изучении электронных дифракционных картин наблюдались несоизмеримые сателлитные дифракционные пятна вплоть до сегнетоэлектрического фазового перехода.

В наших работах [5, 6] при исследовании рассеянного излучения при нагревании в области 20-300°C на экране в дальнем поле наблюдались сложные картины рассеянного излучения. Обнаружена корреляция между температурным поведением картин рассеяния в дальнем поле и температурной эволюцией нанодоменных структур в области несоизмерной фазы ниже 300°C [2, 3].

В настоящей работе сложная картина рассеяния на экране в дальнем поле обнаружена также в температурной области от 300°C до сегнетоэлектрического фазового перехода ( $T_C = 560^\circ\text{C}$ ). Изменения картин рассеяния наблюдаются в области 200°C, 240°C, 260°C, 300°C, 500°C и 560°C. В области от 20 до 300°C изменения картин рассеяния соответствуют температурной трансформации нанодоменных структур. Можно предположить, что область от 500°C до 560°C является температурной областью существования новой несоизмерной фазы в соответствии с работой [4].

Картини рассеяния были получены при прохождении через кристалл луча аргонового лазера ( $\lambda = 514.5 \text{ нм}$ ). Исследованные образцы имели размер  $5 \times 5 \times 3 \text{ мм}^3$  и направление оптической с-оси в плоскости кристалла. Образец помещался в высокотемпературную печь, температура контролировалась платино-платинородиевой термопарой, расположенной вблизи образца. Поляризация луча в разных экспериментах была параллельна или перпендикулярна оптической оси кристалла. Изображения картин регистрировались на экране в дальнем поле на расстоянии 250 см от образца.

#### *Список литературы*

1. Schneck J., Toledano J.C., Joffrin C., Aubree J., Joukoff B., Gabelotaud A.. Neutron scattering study of the tetragonal-to-incommensurate ferroelastic transition in barium sodium niobate // Phys. Rev B. 1982. V.25. P.1766-1785.
2. Mori S., Yamamoto N., Koyama Y., Uesu Y. Memory effect, defect density wave, and related structure in incommensurate phase of barium sodium niobate // Phys. Rev. B. 1995. V.52. P.6158-6161.
3. Kiat J.M., Calvarin G, Schneck J. Coexistence of the 1q and 2q incommensurate phases and memory effect in barium sodium niobate // Phys. Rev. B. 1994. V.49. P.776-785.
4. Pan X.-Q., Hu M.-S., Yao M.-H., Feng D. Tem study of the incommensurate phase and related phase transitions in barium sodium niobate // Phys. Stat. Sol. (a). 1985. V.92. P.57-68.
5. Ivanova S.V. Investigation of peculiarities of light scattering by nanostructural changes in crystal lattice of ferroelectrib barium sodium niobate crystal // Journal of Nanoscience. 2004. V.3. P.815-818.
6. Ivanova S.V. Formation and evolution of far-field patterns of laser beam passing through nonlinear crystal and Raman spectra. //Abstract Book of 9-th European conference on nonlinear optical spectroscopy: Jacobs University Bremen, Germany, 2010. P.68.

Л.Е. СЕМЕНОВА

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва***ГИПЕРКОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЙЯНИЕ СВЕТА  
В CdS ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА С  $A_{n=1}$  ЭКСИТОНОМ**

Рассмотрено резонансное гиперкомбинационное рассеяние света на LO-фононах в кристалле CdS с учетом сложной структуры верхней валентной зоны.

L.E. SEMENOVA

*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow***HYPER-RAMAN SCATTERING OF LIGHT IN CdS  
NEAR RESONANCE WITH THE  $A_{n=1}$  EXCITON**

The resonant hyper-Raman scattering of light by LO-phonons in a CdS crystal is considered, taking into account the complex structure of the highest valence band.

При гиперкомбинационном рассеянии (ГКР) происходит излучение фотона рассеянного света  $\hbar\omega_s$  и рождение фонона  $\hbar\omega_p$  при одновременном поглощении двух фотонов возбуждающего излучения  $\hbar\omega_L$ . ГКР описывается в 4-м порядке теории возмущений. В данной работе предполагается, что в начальном и конечном состоянии электронная система кристалла находится в основном состоянии, а в качестве виртуальных промежуточных состояний рассматриваются экситоны Ванье  $|\Psi_{(cv\lambda)}\rangle$ , которые образуются при переходе электрона из вырожденной (или почти вырожденной) зоны валентности  $v$  с кратностью вырождения  $s_h$  в зону проводимости  $c$  с кратностью вырождения  $s_e$ . В силу малости фотонных и фононных волновых векторов предположим, что процесс рассеяния происходит в центре зоны Бриллюэна.

Волновые функции относительного электронно-дырочного движения  $\tilde{\chi}_{J_e J_h}^{(\lambda)}(\mathbf{r})$  удовлетворяют уравнению [1]

$$\sum_{J_e=1}^{s_e} D_{J_e J_e}^{\alpha\beta} \hat{p}_\alpha \hat{p}_\beta \tilde{\chi}_{J_e J_h}^{(\lambda)}(\mathbf{r}) - \sum_{J_h=1}^{s_h} D_{J_h J_h}^{\alpha\beta} \hat{p}_\alpha \hat{p}_\beta \tilde{\chi}_{J_e J_h}^{(\lambda)}(\mathbf{r}) + U_{eh}(\mathbf{r}) \tilde{\chi}_{J_e J_h}^{(\lambda)}(\mathbf{r}) = (E_\lambda - \varepsilon_{J_e J_h}) \tilde{\chi}_{J_e J_h}^{(\lambda)}(\mathbf{r}) \quad , \quad (1)$$

где  $\hat{p}_\alpha = -i\hbar \partial / \partial r_\alpha$ ,  $U_{eh}(\mathbf{r})$  - энергия кулоновского взаимодействия электрона и дырки,  $E_\lambda$  - энергия экситонного состояния. Ненулевые параметры эффективных масс  $D_{j'j}^{\alpha\beta}$  в случае гексагонального кристалла  $A_2B_6$  можно определить для известной зонной структуры [2]. Если пренебречь анизотропией кристалла и не учитывать  $D_{j_h j'_h}^{\alpha\beta}$ , связывающие различные подзоны верхней валентной зоны, то уравнение (1) сводится к водородоподобному уравнению, для которого известны волновые функции  $\chi_{j_e j_h}^{(sem)}(\mathbf{r})$  и энергии.

С помощью теории возмущений было учтено влияние  $D_{j_h j'_h}^{\alpha\beta}$  ( $j_h \neq j'_h$ ) на 1S состояние экситона и найдены в первом приближении поправки к волновым функциям  $\tilde{\chi}_{j_e j_h}^{(1S)}(\mathbf{r}) \approx \chi_{j_e j_h}^{(100)}(\mathbf{r}) + \varphi_{j_e j_h}^{(1)}$ . Эти поправки не оказывают существенного влияния на дипольное однофотонное поглощение, но в некоторых случаях могут снимать запрет, связанный с правилами отбора, на двухфотонное дипольное возбуждение 1S экситона.

В представленной работе было рассмотрено резонансное ГКР на LO-фононах в CdS для геометрии рассеяния  $z(xx, x+z)y$ , при которой основную роль в ГКР играет механизм, включающий двухфотонный переход в экситоны s-типа В и С серий. Однако при учете поправки первого порядка к волновой функции  $\chi_{j_e j_h}^{(100)}(\mathbf{r})$   $A_{n=1}$  экситоны также могут вносить свой вклад в рассеяние. Как показали приближенные оценки, вклады от экситонов А, В и С серий в ГКР могут быть сравнимы в условиях резонанса ( $2\hbar\omega_L \sim E_{A(n=1)}$ ). А это может привести к дополнительным особенностям на частотной зависимости сечения рассеяния  $\sigma$ , в частности, к уменьшению  $\sigma$  вблизи двухфотонного резонанса с  $A_{n=1}$  экситоном, что не противоречит имеющимся экспериментальным данным. В работе [3] сообщалось о резком росте интенсивности ГКР в CdS, а затем некотором “насыщении” вблизи резонанса с  $A_{n=1}$  экситоном.

Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (грант Президента Российской Федерации № НШ-451.2014.2).

#### Список литературы

1. Denisov M.M., Makarov V.P. // Phys.stat.sol(b). 1973. V.56. P.9-59.
2. Соболев В.В. Зоны и экситоны соединений группы  $A^{II}B^{VI}$ . Кишинев: Штиинца, 1980.
3. Maslov V.A., Ondriash K.K., Polivanov Yu.N., et. al. // Las. Phys. 1996. V.6. P.132-143.



А.И. ЛИВАШВИЛИ, В.В. КРИШТОП, Г.В. КОСТИНА  
 Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

## КОНЦЕНТРАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В НАНОЖИДКОСТИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В СВЕТОВОМ ПОЛЕ

Получено точное решение нелинейного диффузионного уравнения в виде волн переключения. Показано, что в условиях стационарной температуры и нелинейного поглощения света среда становится бистабильной.

A.I. LIVASHVILI, V.V. KRISHTOP, G.V. KOSTINA  
 Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

## CONCENTRATION SWITCHING WAVE IN NANOFUIDS, LOCATED IN A LIGHT FIELD

An exact solution of the nonlinear diffusion equation in the form of switching waves. It is shown that in the steady-state temperature and nonlinear absorption of light by the medium becomes bistable.

Рассматривается жидкофазную среду с микрочастицами, облучаемая световым пучком с равномерно распределенной по кювете интенсивностью  $\tilde{I}_0$ . В результате воздействия светового поля в среде возникает градиенты температуры и концентрации, обуславливающие процессы теплопереноса. Эти явления описываются системой балансных уравнений для температуры и частиц [1]:

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \alpha(C) \tilde{I}_0, \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C + D_T \nabla [C(1-C) \nabla T] \quad (1)$$

В уравнении теплопроводности опущено слагаемое, ввиду его малости, отвечающее за эффект Дюфура. Здесь приняты следующие обозначения:  $T$  – температура среды,  $C = C(r, t) = m_0/m$  – массовая концентрация частиц ( $m_0$  – масса частиц,  $m$  – масса всей среды),  $C_p$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$  – теплофизические постоянные жидкости,  $\tilde{I}_0$  – интенсивность света,  $\alpha(C)$  – коэффициент поглощения среды;  $D$ ,  $D_T$  – коэффициенты диффузии и термодиффузии соответственно.

Рассматривается одномерный случай и исключается вклад от конвективного слагаемого, которое возникает в уравнении диффузии (1). Учитывается тот факт, что процессы установления температуры идут быстрее диффузионных. Это дает возможность изучать последние на фоне стационарной температуры:  $\partial T/\partial t = 0$ . Полагая в равенстве (1)  $\alpha(C) = \alpha_0 - \beta C$  ( $\alpha_0 < \beta$ ), где  $\alpha_0$  – коэффициент поглощения жидкости, а  $\beta$  – коэффициент пропорциональности, получаем диффузионное уравнение в безразмерных переменных

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - C + \left(1 + \frac{\beta}{\alpha_0}\right) \cdot C^2 - \frac{\beta}{\alpha_0} \cdot C^3, \quad (-\infty < y < \infty, 0 \leq \tau < \infty) \quad (2)$$

Нули функции источника в этом уравнении  $F(C): C_1 = 0, C_2 = \alpha_0/\beta, C_3 = 1$ , соответствуют стационарным пространственно однородным состояниям. При этом состояния  $C = C_{1,3}$  – устойчивые (в них  $F'(C) < 0$ ), а состояние  $C = C_2$  – неустойчивое. Таким образом, изучаемая нами среда является бистабильной. С помощью подстановки Коула-Хопфа можно получить точное решение:

$$C(y, \tau) = \sqrt{2 \frac{\beta}{\alpha_0} \frac{M_1 k_i \exp(k_i y + \eta_i \tau) + M_2 k_j \exp(k_j y + \eta_j \tau)}{1 + M_1 \exp(k_1 y + \eta_1 \tau) + M_2 \exp(k_2 y + \eta_2 \tau)}} \quad (3)$$

Таким образом, возникает двухволновое решение. Эти концентрационные волны обеспечивают эффекты переключения между состояниями системы. Решение вида (3) другим методом было получено в работе [2]. Анализ решения с учётом значений параметров  $k$  и  $\eta$  показывает, что в среде распространяются четыре однонаправленные не взаимодействующие между собой волны, скорости которых можно, например, представить в виде

$$v_i = D \sqrt{S_T I_0 \alpha_0 / \lambda} \left( 1 - 3(\beta/2\alpha_0) \frac{1}{2}^{(-1)^{i+1}} + \beta/\alpha_0 \right), \quad \text{где } i = 1, 2$$

Если рассматривать диффузионные процессы на фоне стационарной температуры в условиях постоянного коэффициента поглощения:  $\alpha(C) = \alpha_0$ , то уравнение (2) трансформируется в известное уравнение Фишера, которое имеет одноволновое решение.

#### Список литературы

1. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. М.: Мир, 1964.
2. Данилов В.Г., Субочев П.Ю. Волновые решения полулинейных параболических уравнений // ТМФ. 1991. Т.89. №1. С.25-47.

О.Н. ГАДОМСКИЙ, И.А. ЩУКАРЕВ  
*Ульяновский государственный университет*

## **МАСКИРОВКА ТЕЛ МЕТОДОМ ОБТЕКАНИЯ СВЕТОМ ТЕЛ, ПОКРЫТЫХ КОМПОЗИТНЫМ СЛОЕМ С КВАЗИНУЛЕВЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ**

Представлена теория маскировки тел с применением наноструктурных композитных материалов с наночастицами серебра в полимерной матрице, обладающих квазиулевым показателем преломления в широком диапазоне длин волн от 400 до 1200 нм. Такие материалы являются немагнитными, обладают малым поглощением, изотропны и их показатель преломления слабо зависит от длины волны, поскольку резонанс наночастиц серебра находится в ультрафиолетовой области. Рассматривается случай покрытия на поверхности маскируемого тела произвольной формы и размера из различных веществ при нанесении на их поверхность зеркального слоя и слоя из материала с квазиулевым показателем преломления.

O.N. GADOMSKY, I.A. SHCHUKAREV  
*Ulyanovsk State University*

## **MASKING OF BODIES COVERED WITH A QUASI-ZERO REFRACTIVE INDEX COMPOSITE LAYER BY A WAVE FLOW METHOD**

The theory of masking of bodies with use of the nanostructural composite materials with silver nanoparticles in a polymeric matrix having quasi-zero refractive index in the wide range of lengths of waves from 400 to 1200 nanometers is submitted. Such materials are not magnetic, possess small absorption, isotropical and their refractive index poorly depends on the wavelength as the resonance of nanoparticles of silver is in ultra-violet area. The covering layer on a surface of the masked body of any form and the size from various substances when drawing on their surface of a mirror layer and a layer from material with quasi-zero refractive index is considered.

Известные в настоящее время способы маскировки тел методом волнового обтекания представлены в обзоре [1]. Главным недостатком этих способов маскировки является то, что компоненты магнитной и диэлектрической проницаемостей материалов применяемых для создания маскирующих оболочек сильно зависят от частоты внешнего излучения и эффекта маскировки удастся достигнуть лишь на одной или нескольких частотах.

Мы же предлагаем способ маскировки тел с помощью синтезируемых нами композитных материалов с квазинулевым показателем преломления. Покрытие из этого материала наносится на поверхность тела любой формы и состава, покрытого зеркальной пленкой. Оба этих покрытия наносятся на поверхность тела методом пневматического распыления.

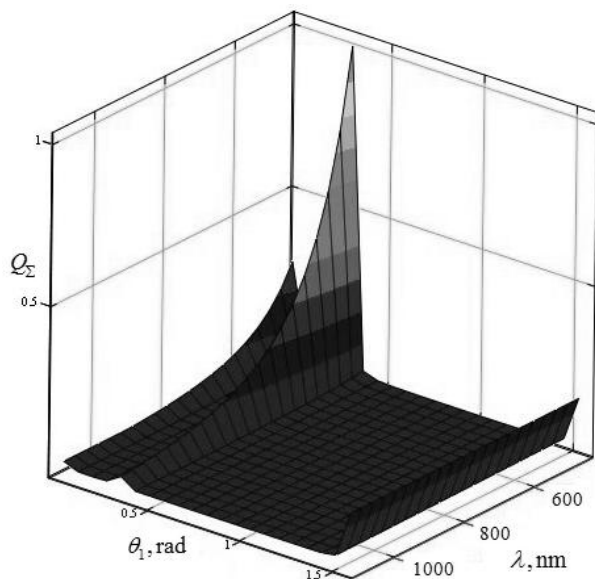


Рис. 1. Суммарный световой поток в относительных единицах, распространяющийся вдоль поверхности маскируемого тела

Сформируем принцип маскировки. Пусть наблюдатель А находится со стороны Солнца по отношению к внешней поверхности маскируемого тела, а наблюдатель В находится под маскируемым телом. Предлагаемый способ маскировки позволит наблюдателю А видеть наблюдателя В и, наоборот, наблюдатель В видит наблюдателя А в результате огибания солнечным светом поверхности маскируемого тела. Из рис. 1 видно, что при малых углах падения света возможно значительное преобразование внешнего светового потока в волну, огибающую поверхность.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (в рамках Государственного задания, проект № 14.Z50.31.0015).

*Список литературы*

1. Дубинов А.Е., Мыгарева Л.А. // УФН. 2010. V.180. P.475.

Б.Б. АВЕРБУХ, И.Б. АВЕРБУХ

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

## СРЕДА ИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДИПОЛЕЙ, ИМЕЮЩАЯ ЕДИНИЧНЫЙ ИЛИ НУЛЕВОЙ ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Получены условия, при которых среда из двух типов электрических дипольных монослоев может вести себя как среда с единичным или нулевым показателями преломления.

B.B. AVERBUKH, I.B. AVERBUKH

*Pacific State University, Khabarovsk*

## THE MEDIUM FROM ELECTRIC DIPOLES WITH SINGLE OR ZERO REFRACTIVE INDICES

Conditions under which the medium from two types of electric dipole monolayers can behave as a medium with a single or zero refractive indices are obtained.

В данной работе, являющейся продолжением работ [1, 2], рассматривается распространение плоской  $s$ - поляризованной электромагнитной волны через границу раздела вакуум – диэлектрик. Диэлектрик сконструирован из двух различных типов электрических дипольных монослоев, чередующихся друг с другом. Диполи с поляризуемостями  $A_{d1} = A_{d1}' - iA_{d1}''$  и  $A_{d2} = A_{d2}' - iA_{d2}''$ , распределенные неупорядоченно с плотностями  $N_{d1}$  и  $N_{d2}$ , формируют нечетные и четные монослои соответственно. Поля диполей учитываются полностью. Все дипольные монослои лежат в плоскостях  $xu$ , пересекающих ось  $z$  в точках  $z_1, z_2, z_3, \dots$ . Расстояния между монослоями по оси  $z$  одинаковы и равны  $a$ , причем  $a \ll \lambda$ , где  $\lambda$  - длина волны излучения. Внешнее поле рассеивается монослоями диполей вперед и назад. Каждый дипольный монослой находится в поле излучения всех других монослоев.

Пусть на первый монослой падает под углом  $\alpha$  поляризованное вдоль оси  $x$  монохроматическое поле  $E_0 = e_0 E_0 \exp(i\omega t - ik_0 r)$  с частотой  $\omega$ , волновым вектором  $k_0 = (0, k_{0y}, k_{0z})$  и вектором поляризации  $e_0$ . В этом случае через диэлектрик распространяется поле с волновым вектором

$\mathbf{K} = (0, k_{0y}, K_z)$ ,  $z$  - компонента которого равна  $K_z = k_{0z} + (\varphi_{d1} + \varphi_{d2})/2a$ , а величины  $\varphi_{d1} = \arctg[P_{d1}'/(1-P_{d1}'')]$  и  $\varphi_{d2} = \arctg[P_{d2}'/(1-P_{d2}'')]$  дают изменения фазы поля, обусловленные излучением нечетных и четных дипольных монослоев соответственно. Здесь  $P_{di} = 2\pi N_{di} A_{di} k^2 / k_{0z}$ , где  $i=1,2$  и  $k = \omega/c$ . Величина вектора  $\mathbf{K}$  равна  $K = (k_{0y}^2 + K_z^2)^{1/2}$ . Представляя  $K$  в виде  $kn(a)$ , можно ввести показатель преломления среды  $n(a) = [1 + 2\zeta \cos \alpha + \zeta^2]^{1/2}$ , где  $\zeta = (\varphi_{d1} + \varphi_{d2})/2ak$ .

При  $\varphi_{d1} + \varphi_{d2} = 0$  получаем, что  $K_z = k_{0z}$  и  $K = k_0$ . В этом случае преломление отсутствует, т.е.  $n(a) = 1$ . Коэффициент отражения от среды  $R_{s1} = (k_{0z} - K_z)/(K_z + k_{0z})$  равен нулю. Коэффициент пропускания  $D_{s1} = 2k_{0z}/(K_z + k_{0z})$  равен единице. Иными словами, поле как бы “не замечает” среду. В случае малых  $P_{d1}$  и  $P_{d2}$  (т.е.  $|P_{d1}| \ll 1$  и  $|P_{d2}| \ll 1$ ) условие  $\varphi_{d1} + \varphi_{d2} = 0$  переходит в не зависящее от угла падения условие  $N_{d1} A_{d1}' + N_{d2} A_{d2}' = 0$  или  $N_{d1} A_{d1}' = -N_{d2} A_{d2}'$ , связывающее между собой плотности распределения диполей  $N_{d1}$  и  $N_{d2}$  с вещественными частями дипольных поляризуемостей  $A_{d1}'$  и  $A_{d2}'$ .

При  $\varphi_{d1} + \varphi_{d2} < 0$  и  $k_{0z} = |(\varphi_{d1} + \varphi_{d2})|/2a$  имеем  $K_z = 0$ . В этом случае возможно  $n(a) = [1 + 2\zeta \cos \alpha + \zeta^2]^{1/2} = 0$ . Последнее условие выполняется, если  $\cos \alpha = 1$ , (т.е.  $\alpha = 0$ ) и  $\zeta = -1$ , т.е.  $\varphi_{d1} + \varphi_{d2} = -2ak$ . Таким образом, при нормальном падении излучения ( $\alpha = 0$ ) рассматриваемая среда может вести себя как среда с нулевым показателем преломления ( $n(a) = 0$ ).

#### Список литературы

1. Авербух И.Б., Авербух Б.Б. Прохождение монохроматической волны через слоистую среду с точки зрения молекулярной оптики // Сб. трудов VI международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2009”. Санкт-Петербург, 2009. С.248-251.
2. Авербух Б.Б., Авербух И.Б. Генерация пространственных гармоник в излучении, распространяющемся через диэлектрик из электрических диполей // Сб. трудов VII международной конференции “Фундаментальные проблемы оптики – 2012”. Санкт-Петербург, 2012. С.111-113.

П.Ф. КАРЦЕВ, И.О. КУЗНЕЦОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ДИНАМИКА ПРОЦЕССА АННИГИЛЯЦИИ ПОЗИТРОНИЯ В СОСТОЯНИИ БОЗЕ-КОНДЕНСАТА**

Теоретически исследуется динамика аннигиляции атомов позитрония в состоянии бозе-конденсата как вариант для создания когерентного источника гамма-излучения. В работе использован диаграммный метод квантового Монте-Карло.

P.F. KARTSEV, I.O. KUZNETSOV

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

## **ANNIHILATION PROCESS DYNAMICS OF POSITRONIUM IN THE STATE OF BOSE EINSTEIN CONDENSATE**

We study theoretically the dynamics of annihilation of positronium atoms in the Bose-Einstein condensate state – a promising scheme of coherent gamma ray source – using the diagrammatic quantum Monte Carlo method.

Создание когерентного источника гамма-излучения является важной задачей, так как даст прибор с уникальными характеристиками для применения как в физике высоких энергий, так и в области биологии и медицины. За последние годы сделаны важные шаги в развитии одной из схем гамма-лазера на основе аннигиляции атомов позитрония (Ps) – связанного состояния электрона и позитрона – находящихся в состоянии бозе-конденсата. В [1] было предложено переводить конденсат атомов Ps, находящихся в долгоживущем триплетном состоянии, в короткоживущее состояние при помощи радиочастотного импульса с рассчитанными параметрами. В [2] было показано, что при аннигиляции такого конденсата возникает когерентный импульс излучения соответствующей частоты, получены оценки для коэффициента усиления и необходимой плотности частиц. Следующим шагом в развитии данной схемы представляется учёт роли внеконденсатных частиц, т.е. конечной температуры. В докладе будут представлены результаты теоретического расчета начальных стадий аннигиляции газа Ps при помощи диаграммного метода квантового Монте-Карло, с учетом конденсата и внеконденсатных частиц.

### *Список литературы*

1. Wang Y.-H., et. al. // Phys. Rev. A. 2014. V.89. P.043624.
2. Avetissyan H.K., et. al. // Phys. Rev. Lett. 2014. V.113. P.023904.

С.А. АСТАШКЕВИЧ

*Санкт-Петербургский государственный университет***ИНФОРМАЦИОННЫЕ НЕРАВЕНСТВА  
ДЛЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ  
ДВУХАТОМНОЙ МОЛЕКУЛЫ**

Впервые проведено систематическое изучение зависимостей информационных неравенств (Крамера-Рао, Бялыницкого-Бирули-Мыцельского и других) от колебательного квантового числа двухатомной молекулы. Эти зависимости рассчитаны для основного электронного состояния димера лития. Проанализированы особенности этих зависимостей, установлена их существенная немонотонность и обнаружена определенная корреляция между ними.

S.A. ASTASHKEVICH

*Saint Petersburg State University***INFORMATIONAL INEQUALITIES FOR VIBRATIONAL  
STATES OF DIATOMIC MOLECULES**

For the first time a systematic study of dependences of informational inequalities (Cramer-Rao, Bialynicki-Birula-Mycielsky and others) from vibrational quantum number of a diatomic molecule is performed. These dependences are calculated for the ground electronic state of the lithium dimer. Peculiarities of the dependencies have been analyzed and it is established that these dependences are essentially non-monotonic and found some correlation between ones.

Информационные неравенства (Крамера-Рао (КР), Бялыницкого-Бирули-Мыцельского (ББМ) и др.) [1] широко используются в квантовой информатике, метрологии и интерферометрии [2]. До сих пор в литературе отсутствует систематическое изучение этих неравенств для колебательных состояний двухатомной молекулы. В настоящей работе мы провели это изучение на примере колебательных уровней основного электронного состояния молекулы  ${}^7\text{Li}_2$ .

Выражения для неравенств КР (1) и ББМ (2) имеют вид (в ат. ед.):

$$D[r]I[r] \geq 1, \quad (1a)$$

$$D[p]I[p] \geq 1, \quad (1b)$$

$$S[r]+S[p] \geq 1+\ln(\pi). \quad (2)$$

Здесь  $D$ ,  $I$  и  $S$  – дисперсия, информация Фишера и энтропия Шеннона, представленные в координатном  $[r]$  и импульсном  $[p]$  пространствах.



Равенство в этих выражениях имеет место в случае Гауссовского распределения вероятностей [1].

В результате численного решения уравнения Шредингера для колебательной волновой функции нами были рассчитаны зависимости левых частей неравенств (1) и (2) от колебательного квантового числа  $\nu$  для молекулы  ${}^7\text{Li}_2$ , используя многопараметрическую полуэмпирическую потенциальную кривую из работы [3]. Эти зависимости для неравенств КР (1) и БМ (2) приведены на рис. 1 и 2, при этом зависимость (2) приведена в экспоненциальном масштабе. Видно, что эти зависимости весьма чувствительны от  $\nu$ , существенно немонотонны и имеют максимум для некоторого значения  $\nu$ . При этом значения зависимостей неравенства КР в координатном и импульсном пространстве довольно значительно (до 20 раз) и нелинейно отличаются друг от друга и имеют максимум при различных  $\nu$ , соответственно для  $\nu=30$  и  $\nu=24$ . Можно отметить определенную корреляцию зависимостей неравенства КР (в координатном пространстве) и БМ, имеющих максимум для одного и того же значения  $\nu$ . Существенная немонотонность зависимостей от  $\nu$  наблюдались также и для других исследованных нами информационных неравенств.

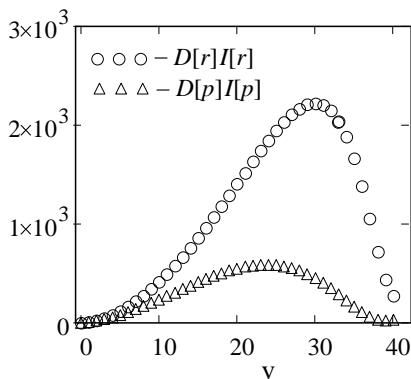


Рис. 1

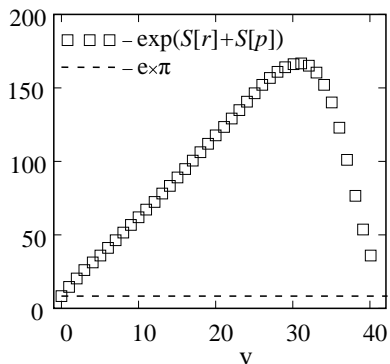


Рис. 2

Полученные результаты могут быть использованы для оптического контроля и управления молекулярными динамическими системами.

#### Список литературы

1. Statistical Complexity /ed. by K.D. Sen. London, New York: Springer, 2011.
2. Sparaciani C., Olivares S., Paris M.G.A. // J. Opt. Soc. Am. B. 2015. V.32. No.7. P.1354.
3. Le Roy R.J., Haugen C.C., Tao J., Li H. // Mol. Phys. 2011. V.109. No.3. P.435.

И.Д. БАБЕНКО, Ю.А. БАРБАНАКОВА, В.В. ГАЛУЦКИЙ,  
Е.В. СТРОГАНОВА, Н.А. ЯКОВЕНКО  
*Кубанский государственный университет, Краснодар*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭРЦИТИВНОГО ПОЛЯ В ГРАДИЕНТНОМ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

В работе представлены сведения о распределении коэрцитивного поля в случае градиентного кристалла ниобата лития.

I.D. BABENKO, Yu.A. BARBANAKOVA, V.V. GALUTSKIY,  
E.V. STROGANOVA, N.A. YAKOVENKO  
*Kuban State University, Krasnodar*

## **MODELLING OF COERCITIVE FIELD IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL WITH GRADIENT OF CONCENTRATION**

In work data on distribution coercitive field in lithium niobate crystal with gradient of concentration are presented.

Благодаря своим уникальным возможностям PPLN преобразователи нашли широкое применение в оптоэлектронной технике. Изготовление PPLN из ниобата лития с градиентом концентрации лития по схеме (рис. 1а) приводит к наличию градиента вектора волновой расстройки [1]. Зависимость показателя преломления от частоты и концентрации лития определяется уравнениями Сельмейера, следует ожидать подобного градиентного поведения и в других диапазонах частот. Измеренные с помощью спектрографа Tera K15 Kit пластины ниобата лития с градиентом концентрации позволили установить наличие градиента в показателе преломления и в терагерцовом диапазоне частот (рис. 1б). Таким образом, градиент концентрации лития приводит к градиентным изменениям в показателе преломления и диэлектрической проницаемости ниобата лития.

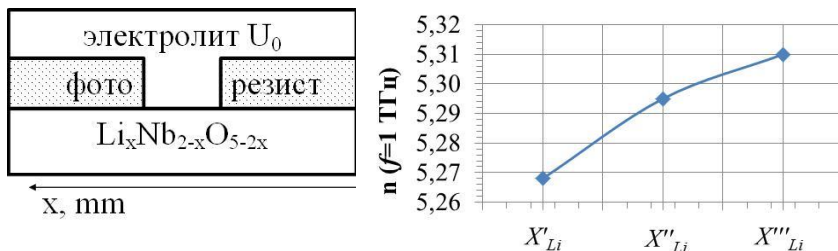
Из решения системы уравнений Лапласа

$$\varepsilon_z \frac{\partial^2 \Phi(x, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x(x) \frac{\partial \Phi(x, z)}{\partial x} \right) = 0$$

при граничных условиях

$$\nabla \Phi(x = 0, x = L) = 0, \Phi(z = 0) = 0, \Phi(z_0, 0 < x < L) = U_0$$

и диэлектрической проницаемости фоторезиста  $\epsilon=3$ , при распределении горизонтальной составляющей диэлектрической проницаемости ниобата лития в диапазоне  $0,8\%/мкм$ , получается распределение потенциала и распределение вектора напряженности коэрцитивного поля внутри кристалла. Распределение вертикальной составляющей вектора напряженности коэрцитивного поля внутри кристалла показано на рис. 2.



#### концентрация лития в кристалле

Рис. 1. Схема приложения поля (а) и градиент показателя преломления (б)

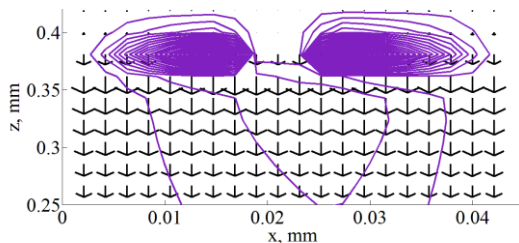


Рис. 2. Распределение вертикальной составляющей напряженности поля

Из рисунков видно, что наличие градиента диэлектрической проницаемости кристалла в плоскости перпендикулярной направлению приложения коэрцитивного поля приводит к искажению силовых линий электрического поля. Данный факт может приводить к вариациям в преимущественном направлении роста доменов и требовать увеличения потенциала, необходимого для переполяризации доменов.

Работа выполнена в рамках проекта госзадания 2014/75 НИР №1291 (14/200-Т).

#### Список литературы

1. Galutskiy V.V., Stroganova E.V., Shmargilov S.A., Yakovenko N.A. // Quantum Electronics. 2014. V.44 (1). P.30.

Е.А. ДМИТРИЕВ, Е.А. БЕРЕЗИНА, В.А. КРАДЬКО,  
В.Ю. РЯБЧЁНОК, А.С. ПЕРИН, В.М. ШАНДАРОВ

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ**

Экспериментально изучены картины распределения интенсивности фокусированного светового пучка на выходной плоскости образца ниобата лития при различных температурах и мощностях лазерного излучения с длиной волны 532 нм. Эксперимент проводился при комнатной температуре, а также при нагреве образца с помощью элемента Пельтье до температуры 40 градусов. Время экспонирования разных точек кристалла световым полем составляло 7 минут. Выявлены различия размера световой картины на выходной плоскости образца, обусловленные пространственной неоднородностью его фоторефрактивных свойств.

E.A. DMITRIEV, E.A. BEREZINA, V.A. KRADKO,  
V. Yu. RYABCHENOK, A.S. PERIN, V.M. SHANDAROV

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

## **STUDY OF SPATIAL INHOMOGENEITY OF PHOTOREFRACTIVE PROPERTIES OF LITHIUM NIOBATE CRYSTAL**

The patterns of intensity distributions of a focused light beam at the output surface of lithium niobate crystal sample have been experimentally studied for the different temperatures and light powers at wavelength of 532 nm. Experiment was carried out at room temperature and at sample heating with the Peltier element to a temperature of 40 degrees. The exposure time of the crystal various points with a light field was 7 minutes. The distinctions of light pattern dimensions at the output surface of the sample resulted from the spatial inhomogeneity of its photorefractive properties have been revealed.

Ранее в экспериментах обнаружено различие характеристик нелинейной дифракции светового пучка в разных областях образца ниобата лития ( $\text{LiNbO}_3$ ) при фоторефрактивном эффекте (ФРЭ) [1, 2]. Целью данной работы является более детальное экспериментальное исследование пространственной неоднородности проявления ФРЭ в подобных образцах.

В экспериментах использовался номинально чистый образец  $\text{LiNbO}_3$  с размерами  $10 \times 4 \times 4$  мм<sup>3</sup> вдоль осей X, Y, Z. Он экспонировался излучением твердотельного лазера  $\text{YAG:Nd}^{3+}$  с длиной волны излучения  $\lambda=532$  нм и выходной мощностью до 50 мВт. Поляризация света соответствовала необыкновенной волне в кристалле. Световой пучок фокусировался на входную грань образца линзой с фокусным расстоянием 40 мм и распространялся вдоль оси X.

Анализ световых картин на выходной грани образца выявил различие их поперечных размеров вдоль оптической оси. Так, на рис. 1 приведены временные зависимости размера светового пятна вдоль оси Z на выходной плоскости для четырех точек, расположенных на расстоянии 2 мм от нижней плоскости образца (плоскость Y) с одинаковыми расстояниями между ними. Видно, что для разных положений зондирующего светового пучка наблюдается разный характер изменения размера светового пятна, что можно связать с пространственной неоднородностью фоторефрактивных свойств образца. Время экспонирования составляло 7 минут при световой мощности 0,3 мВт. Исследованы и особенности компенсации нелинейной дифракции светового пучка при нагреве образца.

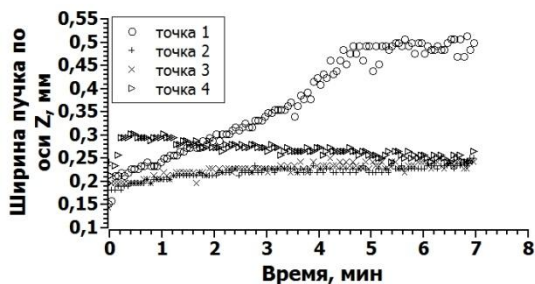


Рис.1. Временные зависимости размера светового пятна вдоль оптической оси кристалла на выходной плоскости для четырех точек

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках (проект № 3642 базовой части Госзадания Минобрнауки РФ на 2015 г. и работа № 3.878.2014/К его проектной части).

#### Список литературы

1. Shandarov V.M., Ryabchenok V.Yu. Perin A.S. // Physics Procedia. 2015. V.70. P.754–757.
2. Shandarov V.M., Perin A.S., Ryabchenok V.Yu. // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 2015. Art. №421.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАЛАТНИКОВ<sup>1</sup>

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск  
<sup>1</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья  
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты*

## **ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В МОНОКРИСТАЛЛАХ LiNbO<sub>3</sub>:Er**

Методом лазерной коноскопии при сканировании входной грани монокристаллов LiNbO<sub>3</sub>:Er получены интерференционные картины, которые позволяют оценить оптическую однородность исследуемых образцов.

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV<sup>1</sup>, M.N. PALATNIKOV<sup>1</sup>

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk  
<sup>1</sup>I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral  
Raw Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

## **THE INTERFERENCE OF LIGHT IN THE SINGLE CRYSTALS LINBO<sub>3</sub>:Er**

By laser conoscopy when scanning the input face of single-crystal LiNbO<sub>3</sub>:Er obtained interference patterns that allow us to estimate the optical homogeneity of the samples.

Для исследования кристаллических образцов LiNbO<sub>3</sub>:Er [3,10 мас.%) и LiNbO<sub>3</sub>:Er [3,60 мас.%) кристаллические булы разрезались на поперечные пластины толщиной ~9 мм с последующим нарезанием их на квадранты со сторонами ~14x27 мм. Коноскопический анализ [1] исследуемых образцов проводился в оптической системе, в которой через монокристалл, помещенный на подвижную двухкоординатную подставку между скрещенными поляризатором и анализатором, пропускалось расходящееся излучение лазера ( $\lambda = 632,8$  нм). Полученная на полупрозрачном экране коноскопическая картина регистрировалась цифровой фотокамерой и выводилась на компьютер.

Признаки аномальной двусосности проявляются на коноскопической картине в виде разрыва черного «мальтийского креста» в центре картины, что позволяет оценить ее визуально по расстоянию между ветвями креста на коноскопической картине, которое связано с углом  $2V$  между возникающими аномальными оптическими осями, а направление разрыва и сдвига частей «мальтийского креста» однозначно связано с направлением деформации оптической индикатрисы.

Анализ коноскопических картин в различных участках входной грани образца  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  [3,10 мас. %] (рис. 1а) показывает, что в центре монокристаллической були коноскопические картины характерны для одноосных кристаллов. В направлении сканирования от центра к периферии появляются отличия от коноскопических картин одноосных кристаллов: просветление и смещение частей «мальтийского креста», изохромы сохраняют целостность, но несколько вытягиваются в направлении смещения фрагментов креста и приобретают вид эллипсов.

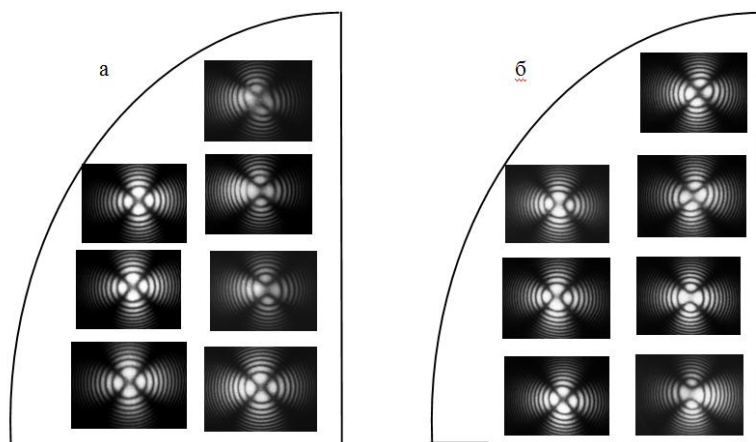


Рис. 1. Распределение коноскопических картин по плоскости входной грани образцов:  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  [3,10 мас. %] (а) ;  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  [3,60 мас. %] (б)

Распределение коноскопических картин по плоскости входной грани, полученное при сканировании образца  $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$  [3,60 мас. %], приведено на рис. 1б. Аномальная двуосность для данного образца присутствует практически в каждой точке входной грани, что проявляется на коноскопических картинах просветлением и разрывом «мальтийского креста», что соответствует углу между аномальными осями  $2V \sim 1^\circ$ . Смещение частей мальтийского креста происходит большей частью в вертикальном или в горизонтальном направлениях. Вместо окружностей, характерных для одноосных кристаллов, наблюдаемые изохромы приобретают вид эллипсов с соотношением малой и большой осей 0,85:1.

#### Список литературы

1. Pikoul O.Yu. Determination of optical sign of a crystal by conoscopic method // J. Appl. Cryst. 2010. V.43. P.949-954.

О.В. ГОРЕВА

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

## **ФОРМИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ОТКЛИКА КРИСТАЛЛОВ ПРИ ВЕКТОРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕТОВЫХ ВОЛН**

Представлены результаты расчета эффективного нелинейного коэффициента при векторном взаимодействии световых волн для кристаллов групп симметрии  $3m$ ,  $6$ ,  $\bar{4}2m$  для различных типов взаимодействий.

O.V. GOREVA

*Irkutsk State Transport University*

## **FORMATION OF THE NONLINEAR RESPONSE OF THE CRYSTAL AT VECTOR INTERACTIONS OF LIGHT WAVES**

The results of the calculation of the effective nonlinear coefficient of the vector interactions of light waves in crystals of symmetry groups  $3m$ ,  $6$ ,  $\bar{4}2m$  to different types of interactions are presented.

Проявление оптической нелинейности связано с наличием в структурах сильно асимметричных связей, когда поляризуемая электронная плотность находится большей частью по одну сторону от центрального атома [1]. Квадратичные нелинейно-оптические эффекты определяются тензором третьего ранга нелинейной восприимчивости, компоненты которого характеризуют величину нелинейного отклика электронной плотности в кристалле в различных направлениях относительно его кристаллофизических осей. Численное значение этих компонент для одной группы симметрии кристаллической структуры определяются химическим составом, атомной структурой, а также частотой излучения, с которым взаимодействует кристалл.

При преобразовании излучения по частоте в нелинейных кристаллах интенсивность преобразованного излучения определяется не только интенсивностью взаимодействующих световых волн, но и эффективным нелинейным коэффициентом  $d_{eff}$ . В работе представлены выражения для расчета эффективного нелинейного коэффициента кристаллов групп



симметрии  $3m$ ,  $6$ ,  $\bar{4}2m$  для векторного взаимодействия световых волн типа  $oo \rightarrow e$ ,  $oe \rightarrow e$ ,  $eo \rightarrow e$ ,  $oe \rightarrow o$ ,  $eo \rightarrow o$ .

В формировании нелинейного отклика кристаллов группы симметрии  $3m$  для типа взаимодействия  $oo \rightarrow e$  участвуют компоненты нелинейной восприимчивости  $d_{16}$ ,  $d_{21}$ ,  $d_{22}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ , для типов взаимодействия  $oe \rightarrow e$ ,  $eo \rightarrow e$ ,  $oe \rightarrow o$ ,  $eo \rightarrow o$  - компоненты нелинейной восприимчивости  $d_{16}$ ,  $d_{21}$ ,  $d_{22}$ ,  $d_{24}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ . Компонента тензора нелинейной восприимчивости  $d_{33}$  в рассматриваемых типах взаимодействия в формировании нелинейного отклика при векторном взаимодействии световых волн не участвует.

В формировании нелинейного отклика кристаллов группы симметрии  $6$  для типа взаимодействия  $oo \rightarrow e$  участвуют компоненты нелинейной восприимчивости  $d_{16}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ , для типов взаимодействия  $oe \rightarrow e$ ,  $eo \rightarrow e$ ,  $oe \rightarrow o$ ,  $eo \rightarrow o$  - компоненты нелинейной восприимчивости  $d_{16}$ ,  $d_{24}$ ,  $d_{31}$ ,  $d_{32}$ . Компонента тензора нелинейной восприимчивости  $d_{33}$  в рассматриваемых типах взаимодействия в формировании нелинейного отклика при векторном взаимодействии световых волн не участвует.

В формировании нелинейного отклика кристаллов группы симметрии  $\bar{4}2m$  для типа взаимодействия  $oo \rightarrow e$  участвуют только компонента нелинейной восприимчивости  $d_{36}$ , для типов взаимодействия  $oe \rightarrow e$ ,  $eo \rightarrow e$ ,  $oe \rightarrow o$ ,  $eo \rightarrow o$  - компоненты нелинейной восприимчивости  $d_{14}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{36}$ .

Для эффективного преобразования излучения по частоте необходимо выполнение условия фазового синхронизма. В случае векторного взаимодействия световых волн при выполнении условий фазового синхронизма углы распространения этих волн относительно кристаллофизических осей нелинейного кристалла принимают различные значения. Значениями этих углов определяется вклад каждой компоненты тензора нелинейной восприимчивости в формирование нелинейного отклика кристалла.

Реализация векторных взаимодействий световых волн в нелинейном кристалле позволяет масштабировать вклад различных компонент тензора нелинейной восприимчивости в формирование нелинейного отклика.

*Список литературы*

1. Corker D.L., Glazer A.M. // Acta Cryst B. 1996 V.52. P.260.

А.И. ГАРИФУЛЛИН, М.А. ХАМАДЕЕВ, Р.Х. ГАЙНУТДИНОВ  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

## **ВЫЧИСЛЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ МЕТОДОМ ПЛОСКИХ ВОЛН И МЕТОДОМ МАТРИЦ РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Для изучения квантовоэлектродинамических явлений в фотонных кристаллах требуется знание дисперсионных соотношений, структуры электромагнитного поля, поскольку пространственно-периодическая модуляция диэлектрической проницаемости оказывает большое влияние на волновые функции фотонов. В данной работе эта проблема исследуется с помощью метода плоских волн и метода матриц распространения.

A.I. GARIFULLIN, M.A. KHAMADEEV, R.Kh. GAINUTDINOV  
*Kazan (Volga region) Federal University, Kazan*

## **CALCULATION OF THE DISPERSION RELATIONS IN PHOTONIC CRYSTALS BY PLANE WAVES EXPANSION METHOD AND TRANSFER-MATRIX METHOD**

To study quantum electrodynamicical phenomena in photonic crystals requires knowledge of the dispersion relations, structure of electromagnetic field, because the spatially periodic modulation of the dielectric constant has a great influence on the wave function of photons. In this paper this problem is investigated using the method of plane wave expansion and transfer-matrix method.

Фотонные кристаллы (ФК) – композитные материалы с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости с периодом, сравнимым с длиной волны света [1, 2]. Периодичность структуры ФК приводит к отличию дисперсионных соотношений для фотона от случая вакуума и, как следствие, к возникновению зонной структуры с фотонными запрещенными зонами [3]. Запрещенные зоны ФК – диапазон энергий, в пределах которого распространение света в ФК подавлено во всех или в некоторых избранных направлениях. Благодаря зонной структуре ФК являются перспективным материалом для создания высококачественных оптических резонаторов (в связи с контролем спонтанного излучения в полости ФК), волноводов, способных проводить свет с малыми потерями, изменять направление движения фотонов на противоположное при малом угле изгиба волновода, дифракционных решеток, интерференционных

фильтров, электрооптических или полностью оптических интегральных схем, «суперлинз», «суперпризм» и т.д. [4]. Помимо исследования и использования свойств фотонных запрещенных зон ФК интересны и с фундаментальной точки зрения: возможность управления частотой спонтанного излучения и скоростью его испускания, и даже для управления массой электрона [5]. Для расчета данных квантовоэлектродинамических характеристик необходимо знать структуру поля, а также дисперсионные соотношения ФК. Поэтому целью данной работы является вычисление дисперсионных соотношений и компонент электромагнитного поля в одномерном фотонном кристалле с помощью метода плоских волн и метода матриц распространения.

*Список литературы*

1. Astratov V.N., et. al. Optical spectroscopy of opal matrices with CdS embedded in its pores - quantum confinement and photonic band gap effects // Nuovo Cimento D. 1995. V.17. P.1349.
2. John S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58. P.2486.
3. Lopez C. Materials aspects of photonic crystals // Advanced Materials. Weinheim. 2003. V.46. P.1679-1704.
4. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics // Phys. Rev. Lett. 1987. V.58. P.2059-2062.
5. Gainutdinov R.Kh., Khamadeev M.A., Salakhov M.Kh. Electron rest mass and energy levels of atoms in the photonic crystal medium // Phys. Rev. A. 2012. V.85. P.053836.

А.О. СЕМКИН, С.Н. ШАРАНГОВИЧ, В.О. ДОЛГИРЕВ,  
Д.И. СОН, С.И. СОН

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

## **ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЖК-ЯЧЕЙКЕ С ПОЛИМЕРНЫМ ФОТООРИЕНТАНТОМ**

В работе экспериментально исследован фотоиндуцированный переход Фредерикса в жидкокристаллических (ЖК) ячейках с полимерным фотоориентантом. Показана возможность голографического формирования дифракционных поляризационных структур в ЖК-ячейках.

A.O. SEMKIN, S.N. SHARANGOVICH, V.O. DOLGIREV,  
D.I. SON, S.I. SON

*Tomsk state university of control systems and radioelectronics*

## **PHOTOINDUCED LASER EMISSION'S POLARIZATION CONDITION CHANGING IN LIQUID CRYSTAL CELLS WITH POLYMERIC PHOTOALIGNER**

Photoinduced Freefericksz transition in liquid crystal cells with polymeric photoaligner has been experimentally investigated in this paper. The possibility of holographic polarization photonic structures formation in liquid crystal is presented.

Исследуемые ЖК-ячейки представляли собой слой нематического жидкого кристалла (НЖК) разной толщины (20 и 100 мкм), заключенного между двумя стеклянными пластинами с нанесенными на них слоями полимерного фотоориентанта [1]. Эксперимент проводился следующим образом: на ЖК-ячейку в одну точку направлялись два линейно поляризованных пучка лазерного излучения разной длины волны: зондирующий пучок (633 нм, 0.5 мВт) и пучок-засветка большей мощности (532 нм, 27 мВт). На выходе ЖК-ячейки излучение проходило через фильтр, которым подавлялось излучение засветки. Далее снималась поляризационная диаграмма зондирующего излучения при помощи поляризатора и фотодиода.

Полученные поляризационные диаграммы (зависимость тока фотодиода от угла поворота поляризатора), приведенные на рис. 1, показывают, что поляризованное излучение засветки изменяет

ориентацию молекул ЖК, что приводит к изменению анизотропии оптических свойств и, следовательно, к изменению эллиптичности и азимута эллипса поляризации зондирующего излучения.

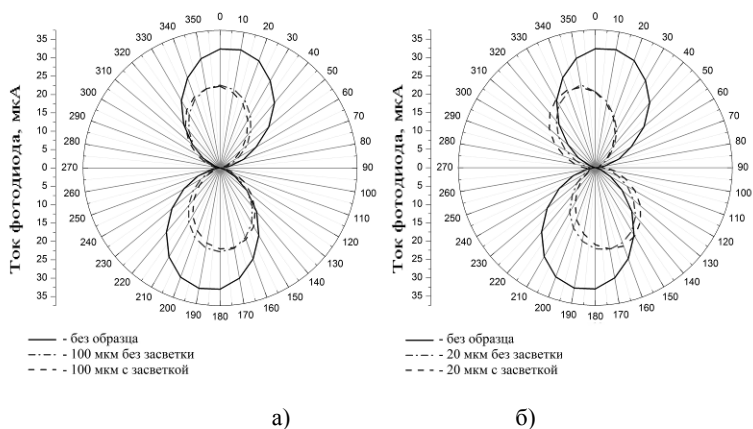


Рис. 1. Поляризационные диаграммы для ЖК-ячеек толщиной 100 мкм (а) и 20 мкм (б)

На рис. 1 кривая 1 – зависимость тока фотодиода от поворота угла поляризатора без ЖК-ячейки, 2 и 3 кривая – зависимость тока фотодиода без засветки и с ней при прохождении излучения через ЖК-ячейку. Из рис. 1 видно, что засветка указанной мощности вызывает изменение состояния поляризации зондирующего пучка (поворот эллипса поляризации на 5-10 градусов и изменение его эллиптичности на 1-5%). Проведенная теоретическая оценка показывает изменение эффективного показателя преломления на уровне 0,0001-0,0005 и возможность голографического формирования дифракционных решеток с эффективностью 2-4%, что соответствует экспериментальным данным [2].

Работа выполнена в рамках проектной части Госзадания Минобрнауки РФ (проект №3.878.2014/К).

#### Список литературы

1. Казак А.А., Мельникова Е.А., Толстик А.Л., Могильный В.В., Станкевич А.И. Управляемые дифракционные жидко-кристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта // Письма в ЖТФ. 2008. Т.34. №20.
2. Жаркова Г.М., Петров А.П., Стрельцов С.А., Хачатурян В.М. Поляризационные голографические решетки в жидкокристаллических композитах // Вестник НГУ. Сер. Физика. 2012. Т.7. №2. С.5–14.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Л.Л. КОВАЛЕНКО

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск***КОНОСКОПИЧЕСКИЕ КАРТИНЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
КВАРЦЕВОЙ ПЛАСТИНКИ  $\lambda/4$** 

Методом лазерной коноскопии получены интерференционные картины фазовой кристаллической пластинки  $\lambda/4$  при повороте анализатора и проведен их расчет в программном пакете Maple.

O.Yu. PIKOUL, L.L. KOVALENKO

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk***CONOSCOPIC PATTERNS OF THE CRYSTAL QUARTZ  
PLATE  $\lambda/4$** 

By laser conoscope method obtained the interference patterns of phase crystal plate  $\lambda/4$  at the turn of the analyzer and their calculations in the software package Maple.

Метод наблюдения в сходящемся поляризованном излучении (коноскопический метод) позволяет исследовать оптические свойства анизотропных кристаллов, которые по-разному проявляются в зависимости от их ориентации относительно направления наблюдения и поляризации излучения [1, 2].

Широкое применение в поляризационных приборах получили кристаллические фазовые  $\lambda/4$  пластинки, которые содержат оптическую ось в плоскости входной грани и при нормальной ориентации вносят разность фаз  $\delta = (\pi/2) \cdot (2k+1)$ , где  $k$  – целое число.

Для кристаллической фазовой пластинки с входной гранью, параллельной оптической оси, интенсивность излучения в пучке после системы поляризатор – кристалл – анализатор описывается выражением [1]:

$$I = 0,5I_0(1 + \cos 2\chi \cos \delta), \quad (1)$$

где  $\chi$  – угол между осями пропускания поляризатора и анализатора;

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \left[ \sqrt{n_e^2(\gamma') - \sin^2 \theta} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 \theta} \right] - \text{разность фаз между}$$

обыкновенным и необыкновенным лучами на выходе из пластинки. Выражение (1) позволило с помощью программного математического пакета Maple рассчитать коноскопические картины пластинки  $\lambda/4$ .

Коноскопические картины (рис. 1) содержат две системы гипербол (линии одинаковой разности фаз) с взаимноперпендикулярными осями.

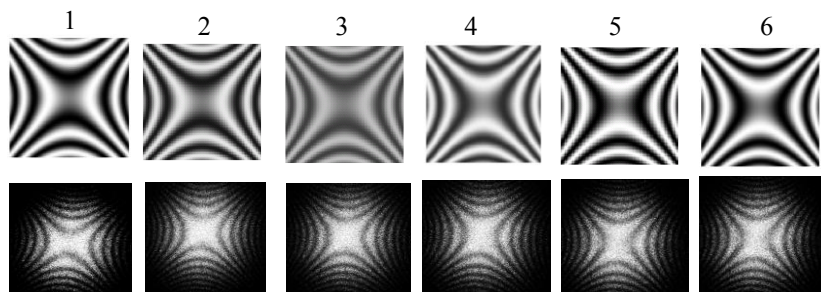


Рис. 1. Коноскопические картины кварцевой пластинки  $\lambda/4$  (оптическая ось в плоскости входной грани). Верхний ряд – теоретический расчет, нижний ряд – результаты эксперимента. Угол между осями пропускания поляризатора и анализатора ( $\chi$ ): 1 -  $90^\circ$ ; 2 -  $72^\circ$ ; 3 -  $60^\circ$ ; 4 -  $20^\circ$ ; 5 -  $10^\circ$ ; 6 -  $0^\circ$ ; угол  $\varphi = 45^\circ$

Поворот анализатора при неподвижном поляризаторе приводит к изменению коноскопической картины кристаллической пластинки: интенсивность изохром падает, контраст картины интерференции снижается и при угле  $45^\circ$  между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора наблюдается равномерно освещенное поле зрения. При дальнейшем повороте анализатора интерференционные полосы вновь появляются и при параллельных поляризаторе и анализаторе симметрия коноскопической картины меняется на  $90^\circ$  (рис. 1, 6) по сравнению с рис. 1, 1. Расчет изображений и экспериментальные исследования выполнены для случая, когда угол  $\varphi$  между направлением колебаний вектора  $E$ , пропускаемым поляризатором, и одним из главных направлений пластинки составляет  $45^\circ$ ; другие значения углов  $\varphi$  приводят к менее четким и контрастным результатам интерференции поляризованных лучей в фазовой кристаллической пластинке  $\lambda/4$ . Рассчитанные коноскопические картины достаточно хорошо совпадают с экспериментально полученными коноскопическими картинами кварцевой кристаллической пластинки толщиной 3,3 мм, освещенной излучением He-Ne лазера ( $\lambda_0 = 632,8$  нм).

#### Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.
2. Veiras F.E., Garea M.T., Perez L.I. Wide angle conoscopic interference patterns in uniaxial crystals // Appl.Opt. 2012. V.51. №15. P.3081-3090.

**А.И. ИЛЛАРИОНОВ**

*Иркутский государственный университет путей сообщения*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБЕРРАЦИЙ ФОКУСИРУЮЩИХ ЛИНЗ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Приводятся результаты исследований геометрических aberrаций третьего порядка фокусирующей инфракрасной оптики. Показано, что каждому типу aberrаций соответствует определенная пространственно-угловая структура второй оптической гармоники, что послужило основой для разработки нового оригинального метода определения погрешностей фокусирующих инфракрасных линз.

**A. I. ILLARIONOV**

*Irkutsk State Transport University*

## **DETERMINATION ABERRATIONS FOCUSING LENSES BY NONLINEAR OPTICAL METHOD**

Results of researches of geometrical aberrations of the third order of the focusing infrared optics are given. It is shown that to each type of aberrations there corresponds a certain spatial and angular structure of the second optical harmonica that formed a basis for development of a new original method of definition of errors of the focusing infrared lenses.

Реальные фокусирующие оптические системы имеют технические погрешности (aberrации), их исправление является громоздкой и довольно дорогостоящей задачей. Как правило, оптические системы до проведения прецизионных исследований проверяют на наличие aberrаций (наиболее точный метод, который применяется в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах спектра – дорогостоящий и довольно длительный метод Гартмана). Проблема измерения aberrаций наиболее остро стоит для фокусирующей ИК-оптики, в видимой области спектра можно с определенной точностью измерить величину сферической aberrации по «кружку рассеяния».

В данной работе предлагается исследовать aberrации ИК-оптики с помощью перевода частоты сфокусированного лазерного ИК-излучения, которое «несет» информацию об оптических aberrациях, в видимую область спектра с помощью нелинейно-оптических кристаллов. Информация об aberrациях оптических систем сохраняется в данном случае в пространственно-угловой структуре преобразованного в



видимую область спектра излучения. В работах [1-3] была исследована центральная часть структуры преобразованного по частоте излучения; теоретически было показано, что на процессы генерации второй оптической гармоники (ВОГ) оказывают влияние, искажая ее угловую структуру, три вида геометрических aberrаций - сферическая aberrация, кома и астигматизм. В последующих оригинальных авторских работах, сгруппированных в [4], проведено детальное исследование влияния сферической aberrации, комы и астигматизма на пространственно-угловую структуру ВОГ. На рис. 1 показаны теоретически (а, в) и экспериментально (б, г) полученные угловые структуры ВОГ ИК излучения с длиной волны 1,064 мкм, обладающего сферической aberrацией (а, б), комой (в) и астигматизмом (г). Видно хорошее соответствие результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований. Теоретические расчеты были проведены для трехволнового взаимодействия при выполнении условий синхронизма ( $\Delta k=0$ ), в экспериментах использовался кристалл иодата лития, вырезанный в направлении коллинеарного синхронизма для  $oo \rightarrow e$  взаимодействия, накачка осуществлялась неодимовым лазером с длиной волны 1,064 мкм.

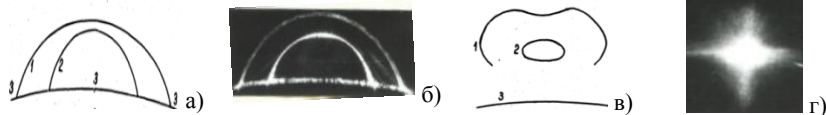


Рис. 1

На основании проведенных исследований установлено, что:

1. Каждому виду геометрических aberrаций соответствует своя (оригинальная) пространственно-угловая структура второй оптической гармоники.
2. При  $\Delta k \neq 0$  (отсутствие синхронизма) структура  $2\omega$  практически повторяет структуру  $\omega$ .
3. При  $\Delta k = 0$  в структуре  $2\omega$  проявляются ярко выраженные синхронные векторные взаимодействия (кривые 1 и 2 на рис. а, в), которые передают информацию о типе геометрической aberrации. Вышеотмеченное послужило основой для разработки оригинального нелинейно-оптического метода определения aberrаций фокусирующих оптических систем.

#### Список литературы

1. Зельдович Б.Я. // ЖЭТФ. 1966. Т.50. Вып.3. С.680-690.
2. Строганов В.И., Тарасов В.М., Самарин В.И. // Опт. и спектр. 1972. Т.32. С.834-836.
3. Кривошеков В.Г., Самарин В.И., Строганов В.И. // Труды конф. «Нелинейные процессы в оптике». Новосибирск, 1973. С.320-328.
4. Илларионов А.И. Нелинейные преобразования световых волн со сложным фазовым фронтом в анизотропных кристаллах. Автореф. дис... докт. физ.-мат. наук. Иркутск, 1997.

Г.И. ГАРНАЕВА, Л.А. НЕФЕДЬЕВ, А.Р. САХБИЕВА  
*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань*

## **ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТРАНСПАРАНТА ВНЕШНИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ СТОЯЧИМИ ВОЛНАМИ В ОПТИЧЕСКОЙ ЭХО-ГОЛОГРАФИИ**

Рассмотрены запись и воспроизведение информации с использованием обращенной стимулированной эхо-голограммы при воздействии на записывающую среду импульсов нерезонансных электромагнитных стоячих волн.

G.I. GARNAEVA, L.A. NEFEDIEV, A.R. SAHBIIEVA  
*Kazan (Volga region) Federal University, Kazan*

## **THE IMAGE CONVERSION OF TRANSPARENCY BY EXTERNAL ELECTROMAGNETIC STANDING WAVES IN THE OPTICAL ECHO-HOLOGRAPHY**

Reviewed the record and reproduction of information with use of the stimulated echo turned holograms when exposed to a recording environment of the pulses the non-resonant electromagnetic standing waves.

Запись динамических эхо-голограмм, в условиях когерентного нелинейного взаимодействия объектного и референтного лазерного импульса с резонансной средой, дает возможность запоминать и воспроизводить информацию о динамических процессах, связанных с изменением состояний в пространстве и времени.

Возникает вопрос: можно ли управлять воспроизводимым в отклике стимулированной эхо-голограммы изображением. Управлять изображением в отклике стимулированной эхо-голограммы можно путем изменения каким либо способом амплитуд, связанных с направлением распространения пространственных компонент объектного лазерного импульса. В качестве такого механизма воздействия на компоненты объектного лазерного импульса можно использовать эффект запираения фотонного эха [1-3]. В работе исследовано влияние нерезонансных электромагнитных стоячих волн на изображение транспаранта в отклике стимулированной эхо-голограммы, когда в качестве объектного берется первый возбуждающий лазерный импульс. Был рассмотрен случай, когда у транспаранта одинаковая пропускная способность по всей поверхности.

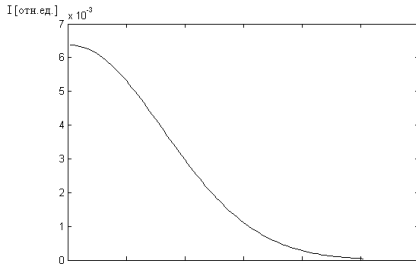


Рис. 1. Распределение интенсивности отклика стимулированной эхо-голограммы по транспаранту. Начало отсчета – центр транспаранта.  $E_1=E_2=0$ В/см

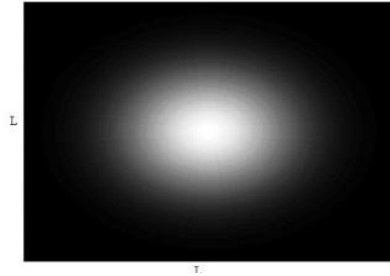


Рис. 2. Изображение в отклике стимулированной эхо-голограммы.  $E_1=E_2=0$ В/см

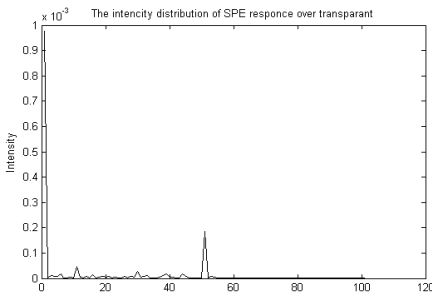


Рис. 3. Распределение интенсивности отклика стимулированной эхо-голограммы по транспаранту. Начало отсчета – центр транспаранта.  $E_1=2909$  В/см,  $E_2=0$ В/см

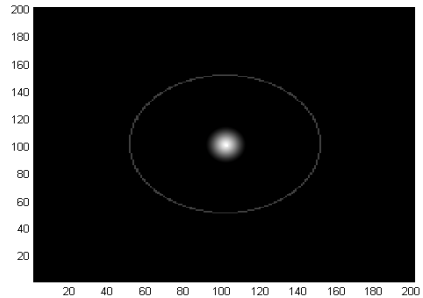


Рис. 4. Изображение в отклике стимулированной эхо-голограммы.  $E_1=2909$  В/см,  $E_2=0$ В/см

Воздействие нерезонансных стоячих электромагнитных волн при записи стимулированной эхо-голограммы приводит к возможности управления изображением в отклике СЭГ (см. рис. 1-4). При определенных величинах напряженностей электромагнитных стоячих волн возможно концентрация энергии в различных областях изображения.

#### Список литературы

1. Nefediev L.A., Hakimzyanova E.I., Garnaeva G.I. // Optics and photonics. 2013. V.3. No.7. P.360-363.
2. Nefediev L.A., Garnaeva (Hakimzyanova) G.I. Effect // Optics and Spectroscopy. 2008. V.105. No.6. P.1006-1011.
3. Нефедьев Л.А., Гарнаева Г.И., Ахмедшина Е.Н. // Журнал прикладной спектроскопии. 2014. Т.81. №3. С.476-479.

Е.Л. БУБИС<sup>1</sup>, В.В. ЛОЖКАРЕВ<sup>1</sup>, А.Н. СТЕПАНОВ<sup>1,3</sup>,  
А.И. СМІРНОВ<sup>1,3</sup>, В.О. МАРТЫНОВ<sup>1</sup>, О.А. МАЛЫШАКОВА<sup>1</sup>,  
Д.Е. СИЛИН<sup>1</sup>, С.А. ГУСЕВ<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

<sup>2</sup>*Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород*

<sup>3</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

## **ОТНОСИТЕЛЬНО ИНВЕРТИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОГО НЕПРОЗРАЧНОГО ОБЪЕКТА ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ОСВЕЩАЮЩЕГО ЕГО ПУЧКА В ПОГЛОЩАЮЩУЮ СРЕДУ**

Описан процесс адаптивного самоинвертирования изображения (нелинейного переключения) мелкомасштабного непрозрачного объекта, имеющего место при фокусировке пространственно амплитудно-модулированного освещающего лазерного пучка в (слабо) поглощающую среду. Показано, что, несмотря на нелокальность процесса (тепловая нелинейность), инвертированное по яркости изображение обладает приемлемым качеством и высоким коэффициентом преобразования.

E.L. BUBIS<sup>1</sup>, V.V. LOZHKAREV<sup>1</sup>, A.N. STEPANOV<sup>1,3</sup>,  
A.I. SMIRNOV<sup>1,3</sup>, V.O. MARTYNOV<sup>1</sup>, O.A. MALSHAKOVA<sup>1</sup>,  
D.E. SILIN<sup>1</sup>, S.A. GUSEV<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the RAS, Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Institute for Physics of Microstructures of the RAS, Nizhny Novgorod*

<sup>3</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

## **ABOUT THE INVERSION OF AN IMAGE OF A SMALL-SCALE OPAQUE OBJECT IN ILLUMINATING BEAM FOCUSING AT THE ABSORBING MEDIUM**

We describe the adaptive process of self-inversion of the image (nonlinear switching) of a small-scale non-transparent object, which takes place when the spatially amplitude-modulated illuminating laser beam is focused into a (weakly) absorbing medium. It is shown that, despite the nonlocal process (thermal nonlinearity), the image with inverted brightness has an acceptable quality and a high conversion coefficient.

Инверсия изображения наблюдалась при различных видах нелинейно-оптических процессов [1]. В данной работе описана инверсия изображения мелкомасштабного непрозрачного объекта при фокусировке

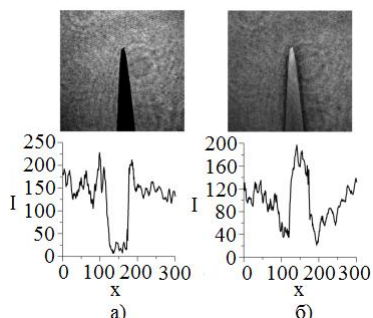


Рис. 1. Прямое (а) и инвертированное (б) изображение кончика иголки

просвечивающего пучка в поглощающую среду, на тепловом механизме нелинейности. В его основе лежит идеология классического метода фазового контраста Цернике [2]. Для реализации инверсии фазовый сдвиг  $\theta$  между нулевой и высшими пространственными частотами, участвующими в формировании изображения данного объекта, составляет  $\theta \approx \pm\pi$ .

В эксперименте использовалась оптическая схема аналогичная схеме для визуализации прозрачных объектов в фазоконтрастной схеме с фототермическим фильтром [3]. На рис. 1, в качестве примера, представлены прямое и инвертированное изображения кончика иголки и соответствующие данным изображениям срезы интенсивности. В эксперименте получено, что процесс высоким коэффициентом преобразования имеет место только для мелкомасштабных, по отношению к зондирующему пучку, объектов. На инвертированном изображении всех объектов отчетливо наблюдается эффект подчеркивания краев (усиления границ). Экспериментальные результаты сходятся с численными расчетами. При численных расчетах рассматривался случай переноса изображения из двойного фокуса в двойной. Анализ производился аналогично [4]. Для расчета выходного поля использовался дифракционный интеграл Френеля – Кирхгофа в паракиральном приближении. В расчетах предполагалось, что исследуемый непрозрачный объект освещается лазерным пучком с гауссовым профилем интенсивности и плоским волновым фронтом.

Процессы нелинейной визуализации и инверсии могут быть использованы для коррекции и обработки изображений, формирования пучков с заданным поперечным профилем интенсивности в плоскости изображения в процессах обработки материалов, а также играть роль и, возможно, быть использованы в атмосферных лазерных линиях связи при повышенных мощностях (энергиях) излучения.

#### Список литературы

1. Ochoa E., Hesselink L., Goodman J. // Applied Optics. 1985. V.24. No.12. P.1826-1832.
2. Маршалль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М.: Мир, 1964.
3. Бубис Е.Л. // Квантовая электроника. 2011. Т.41. №6. С.568.
4. Бубис Е.Л. // Письма в журнал технической физики. 2008. Т.34. №12. С.29-33.

М.Е. ЧЕРНЯК<sup>1,2</sup>, Е.А. МЕХОВСКИЙ<sup>1,2</sup>, А.В. УЛАНОВА<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>ЭНПО «Специализированные электронные системы», Москва

## **АНАЛИЗ ЭФФЕКТА УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМНОВОГО СИГНАЛА ПЗС-МАТРИЦЫ С МЕЖСТРОЧНЫМ ПЕРЕНОСОМ ПРИ ГАММА-ОБЛУЧЕНИИ**

Приведены результаты исследования деградации темнового сигнала ПЗС-матрицы видимого диапазона с межстрочным переносом КАИ-2093 при дозовом воздействии.

M.E. CHERNIAK<sup>1,2</sup>, E.A. MEKHOVSKIY<sup>1,2</sup>, A.V. ULANOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

<sup>2</sup>Specialized Electronic Systems, Moscow

## **ANALYSIS OF THE INTERLINE CCD-SENSOR DARK SIGNAL INCREASE UNDER GAMMA-IRRADIATION**

The paper discusses the dark signal degradation in interline transfer CCD for visible range KAI-2093 under gamma-irradiation.

ПЗС-матрицы являются одним из инструментов решения задач дистанционного зондирования Земли и навигации космических аппаратов по звездам. При функционировании на орбитах Земли ПЗС-матрицы подвергаются воздействию радиации, способному ухудшить параметры сенсора или привести к катастрофическому отказу (эффекты, связанные с накоплением радиационной дозы). Для прогнозирования данных эффектов проводятся испытания на стойкость к дозовому воздействию.

Одним из эффектов, проявляющихся при дозовом воздействии, являлось увеличение темнового сигнала ПЗС-матрицы. Основной вклад в результирующий темновой сигнал вносит поверхностный темновой ток, обусловленный генерацией электронов на границе раздела диэлектрик-кремний [1].

Облучение образцов КАИ-2093 гамма-квантами проводилось на установке с двумя независимыми камерами с изотопами Cs<sup>137</sup> и Co<sup>60</sup> «Панорама-МИФИ» со средней энергией квантов 662 кэВ (Cs<sup>137</sup>) и 1,25 МэВ (Co<sup>60</sup>). Во время облучения ПЗС-матрицы находились в активном режиме с периодическим контролем параметров. Темновые изображения, полученные до и после воздействия, приведены на рис. 1.



Рис. 1. Темновые изображения с ПЗС-матрицы КАИ-2093 в отсутствии света до (слева) и после (справа) воздействия гамма-излучения

За счет термической генерации в области пространственного заряда (ОПЗ) фоточувствительной части пикселя образуются электронно-дырочные пары. Электроны и дырки разделяются полем ОПЗ и перемещаются в  $n+$  и  $p$  области соответственно (см. рис. 2).

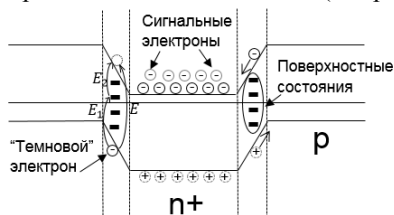


Рис. 2. Зонная диаграмма фоточувствительной части пикселя ПЗС

При воздействии излучения на границе раздела кремний-диэлектрик образуются поверхностные состояния (ПС), увеличивающие выход термической генерации за счет дополнительных уровней в области пространственного заряда (процесс Шокли-Рида-Холла). В результате, даже при отсутствии попадания света на ПЗС-матрицу, термически генерируются дополнительные «темновые» электроны, которые приводят к увеличению среднего темного сигнала.

В рамках данной работы был рассмотрен основной механизм увеличения темного сигнала в ПЗС-матрицах при дозовом воздействии. Полученные результаты приводят к необходимости разработки методов компенсации индуцированного темного сигнала в приборах на основе ПЗС-матриц для применений в условиях космического пространства.

#### Список литературы

1. Li F., Nathan A. Image sensors in deep-ultraviolet: Degradation behavior and damage mechanisms. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2005.

А.А. УХОВ, Д.К. КОСТРИН,  
В.А. ГЕРАСИМОВ, Л.М. СЕЛИВАНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет*

## ПОДАВЛЕНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В СТРУКТУРЕ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКОВ

В работе рассмотрены причины возникновения интерференции в структуре ПЗС-фотоприемников. Приведен способ устранения интерференции путем нанесения дополнительного слоя на поверхность фотоприемника.

А.А. УНОВ, Д.К. КОСТРИН,  
V.A. GERASIMOV, L.M. SELIVANOV  
*Saint Petersburg State Electrotechnical University*

## SUPPRESSION OF INTERFERENCE IN THE STRUCTURE OF CCD PHOTODETECTORS

In this paper the causes of interference in the structure of CCD photodetectors are considered. Method of eliminating interference by deposition of additional layer on the surface of photodetector is shown.

Традиционная конструкция ПЗС-фотоприемника (ПЗСФП) приведена на рис. 1. На поверхности ПЗСФП лежит тонкий слой естественного оксида. При фиксированной толщине слоя зависимость коэффициента пропускания от длины волны носит периодический характер для представленной системы. Поверхностная пленка окисла практически не влияет на форму сигнала в случае монохроматического излучения. Однако при регистрации спектров каждый пиксель засвечивается монохроматическим излучением. В результате, на границе раздела двух сред с различными показателями преломления неизбежно возникает интерференция (рис. 2).

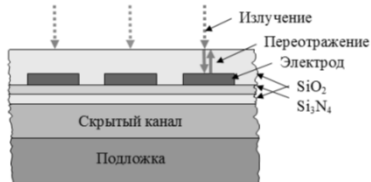


Рис. 1. Упрощенная внутренняя структура ПЗСФП

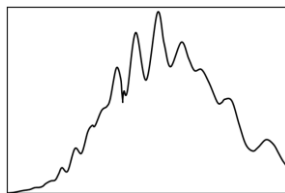


Рис. 2. Форма сигнала при регистрации спектра лампы накаливания



Один из способов подавления интерференции – нанесение на облучаемую поверхность ПЗСФП тонкого слоя материала, обладающего сильным рассеянием. В результате на поверхность секции накопления будет попадать не когерентное излучение, а рассеянное, вследствие чего условие возникновения интерференции будет выполняться лишь для незначительной доли входного потока. В качестве такой поверхности будем рассматривать ту же пленку, содержащую рассеивающие центры на поверхности. Рассеивающие центры представляют собой сферические частицы, размеры которых малы по сравнению с длиной волны (рис. 3).

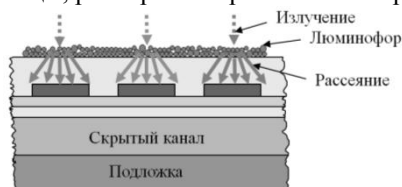


Рис. 3. Структура ПЗСФП с люминофором

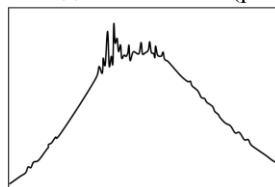


Рис. 4. Форма сигнала при использовании люминофора

Было определено, что самым подходящим материалом для такой модификации ПЗСФП будет люминофор. Люминофор, при соответствующей технологии нанесения на ПЗСФП, представляет собой плоскопараллельный слой светорассеивающей среды. При этом можно считать, что на каждую элементарную площадку, равную площади одного пикселя, падает монохроматическое излучение.

Характеристики слоя люминофора очень сильно зависят от распределения частиц по размерам. Размер зерен люминофора влияет на качество его закрепления на поверхности ПЗСФП. Причем прочность закрепления люминофора растет при уменьшении размеров зерна, однако при этом одновременно снижается эффективность возбуждения люминофора в результате повышения коэффициента отражения возбуждающего излучения.

Люминофор К-77 был осажден на поверхность секции накопления ПЗСФП типа TCD1304AP фирмы Toshiba. Нанесение люминофора не повлияло на разрешающую способность спектрометра и устранило волнистость спектральной характеристики спектрометра (рис. 4). Шумы, возникающие при регистрации спектра лампы накаливания, объясняются наличием инородных частиц в использованном люминофоре. Эти отклонения носят стационарный во времени характер и в дальнейшем могут быть устранены путем совершенствования технологии осаждения люминофора.

С.С. МИТРОФАНОВ, К.С. ПОВАРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРУГОВОГО ФОТОПРИЕМНИКА "МУЛЬТИСКАН"**

Проведено исследование точностных характеристик позиционно-чувствительного фотоприёмника "мультискан" для возможности построения на нём малогабаритных абсолютных преобразователей угол-код повышенной точности. Полученные результаты в процессе экспериментального исследования нелинейности составили величину 11%, однако было выявлено сильное влияние эксцентриситета установки кругового мультискана и после алгоритмической коррекции его влияния, остаточная величина нелинейности не превысила 1%. Было выявлена высокая стабильность и воспроизводимость фотоприёмника.

S.S. MITROFANOV, K.S. POVAROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

## **RESEARCH OF PRECISION CHARACTERISTICS OF A CIRCULAR PHOTODETECTOR OF "MULTISKAN"**

In this work there was a research of precision characteristics of a position sensitive photodetector "multiscan" for the solution of possibility of construction on it small-sized absolute converters a corner code of the increased accuracy. The received results in the course of performance of a pilot study of nonlinearity made the size of 11%, however strong influence of eccentricity of installation of the circular multiscan and after algorithmic correction of its influence was revealed, the residual size of nonlinearity didn't exceed 1%. Was high stability and reproducibility of a photodetector is revealed.

В процессе измерения угловых величин применяются фотоэлектрические преобразователи накапливающего и абсолютного типа, основанные на растрах, кодовых шкалах (дисках), дифракционных решетках, которые имеют сложную конструкцию, поэтому создание малогабаритных и простых устройств является актуальной задачей.

Одним из возможных решений является применение кругового фотоприёмника «Мультискан». Он представляет собой кремниевую структуру, сформированную на КСДИ (кремний с диэлектрической изоляцией), содержащую набор встречновключенных диодов, одни концы которых подключены к распределенному делителю напряжения, а другие – к низкоомной сигнальной шине. В режиме «координатуказателя» на один из делительных слоев мультискана подается опорное напряжение, а

с другого снимается напряжение сигнала, пропорциональное угловой координате светового пятна на мультискане [1, 2]. Данных о точностных возможностях кругового фотоприемника «Мультискан» мало и судить о потенциальных областях его применения сложно. В работе исследованы его характеристики: нелинейность, воспроизводимость и стабильность.

Для изучения нелинейности было сделано 3 серии измерений в диапазоне 140 градусов, по результатам этих измерений были построены графики зависимости напряжения на мультискане от угла (рис. 1). Затем была произведена линейная аппроксимация полученных данных методом наименьших квадратов. Максимальная нелинейность при измерениях составила 11%. Как показал анализ основных источников погрешностей, основной вклад вносит эксцентриситет установки фотоприемника.

При исследовании воспроизводимости было сделано несколько серий по 30 измерений в каждой. Анализ результатов этих измерений показал, погрешность воспроизводимости подчиняется нормальному закону распределения с численными характеристиками, равными  $\bar{x} = 3,318 В$  – среднее арифметическое значение,  $\sigma = 0,004 В$  – среднеквадратичное отклонение, что в угловой мере составляет  $6,1'$ .

При исследовании стабильности фотоприёмника в пределах диапазона его работы выбирались точки с шагом  $10^\circ$ , в которых в течение 30 минут измерялось выходное напряжение. Практически во всех точках измерения характер изменения выходного напряжения носил плавный характер возрастания. На всем диапазоне величина выходного напряжения меняется достаточно мало, что можно признать приемлемым.

Проведенные исследования показывают, что характеристики кругового фотоприёмника мультискан такие, как нелинейность выходного напряжения, воспроизводимость и стабильность, позволяют использовать его для создания малогабаритных фотоэлектрических преобразователей.

#### Графики нелинейности

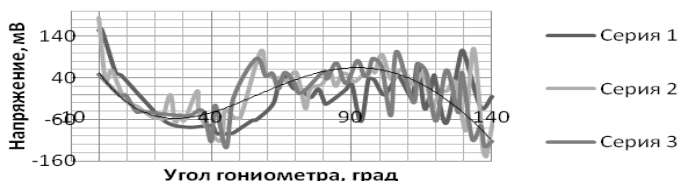


Рис. 1. Нелинейность фотоприёмника мультискан

#### Список литературы

1. Берковская К.Ф. и др. // Научно-технические достижения. ВИМИ. 1992. Вып.2. С.22.
2. Воронин А.А., Митрофанов С.С. // Изв. вузов. Приборостроение, 2007. Т.50. №4. С.47.

А.А. НАСТУЛЯВИЧУС, Е.В. ПОПОВА, А.А. СТИФУТКИН,  
П.Ж. БУЖАН, А.Л. ИЛЫН, О.Б. МАВРИЦКИЙ, А.Н. ЕГОРОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ**

Приведены результаты практического применения сфокусированного импульсного лазерного излучения малой длительности для исследования процесса гейгеровского разряда в кремниевых фотоумножителях. Экспериментально показано, что использование фемтосекундных лазерных импульсов для исследования динамики развития лавины в данных приборах дает более точные результаты.

A.A. NASTULYAVICHUS, E.V. POPOVA, A.A. STIFUTKIN,  
P.Zh. BUZHAN, A.L. ILYIN, O.B. MAVRITSKII, A.N. EGOROV  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **APPLICATION OF ULTRASHORT LASER PULSES FOR TIMING CHARACTERIZATION OF SILICON PHOTOMULTIPLIERS**

The application of the focused ultrashort-pulsed laser irradiation for the investigation of Geiger discharge process in silicon photomultipliers is discussed. It is shown experimentally, that the investigation of avalanche dynamics in such devices by femtosecond laser pulses gives more precise results.

Твердотельные кремниевые фотоэлектронные умножители (SiФЭУ) – быстро развивающийся класс фотодетекторов, предназначенных для регистрации импульсного оптического излучения малой интенсивности. Одним из наиболее важных применений SiФЭУ является регистрация отдельных фотонов в медицинской или астрофизической аппаратуре [1, 2]. SiФЭУ представляет собой матрицу из кремниевых фотодиодов (ячеек), объединенных на общей подложке. В гейгеровском режиме (при напряжении смещения, несколько превышающем порог электрического пробоя) каждый рожденный фотоном носитель заряда приводит к лавинообразному разряду ячейки.

Одной из важнейших характеристик SiФЭУ является их высокое быстродействие. Однако, оптимизация их временных параметров требует

более детального изучения динамики развития гейгеровского разряда в отдельной ячейке. Ранее было показано что время развития гейгеровского разряда составляет порядка 10 пс [3]. Поэтому, используя лазерные импульсы с меньшей длительностью, представляется возможным наблюдение столь быстрых процессов с достаточным временным разрешением. Учитывая также, что характерный эффективный диаметр лавины составляет около 10 мкм, можно надеяться, что варьируемая фокусировка лазерного пучка в пятно диаметром от единиц до десятков микрон позволит исследовать и пространственные особенности лавинного пробоя в пределах чувствительной площади ячейки.

В работе экспериментально исследовались временные характеристики опытных образцов SiФЭУ при воздействии ультракоротких лазерных импульсов. Образцы в виде ячеек размером 100×100 мкм были совместно разработаны в НИЯУ МИФИ и ФГУП НПП «Пульсар». Измерения проводились на двух лазерных источниках ультракоротких импульсов: пикосекундном (650 нм, 40 пс) и фемтосекундном (870 нм, 170 фс) [4]. Для наблюдения облучаемой области и задания диаметра лазерного пучка (от 2 мкм и более) на исследуемом образце использовался микроскоп с лазерным вводом. Сигнал с SiФЭУ статистически обрабатывался с помощью записывающего осциллографа LeCroy WaveRunner 620Zi. Измерялись величина задержки и разброс моментов срабатывания ячейки относительно лазерных импульсов, регистрируемых быстродействующим рpиn-диодом, в зависимости от интенсивности и размера пятна излучения, а также от величины «перенапряжения» (превышения напряжения смещения ячейки над пороговым напряжением пробоя). Результаты показали, что фемтосекундные лазерные импульсы дают меньший разброс моментов срабатывания ячейки по сравнению с пикосекундными. Применение фемтосекундного возбуждения позволило надежно зарегистрировать уменьшение ширины разброса, соответствующее росту временного разрешения (в однофотонном режиме) ячейки SiФЭУ при увеличении перенапряжения. При пикосекундном возбуждении данная зависимость в явном виде не наблюдалась.

*Список литературы*

1. Degenhardt C., et al. The digital silicon photomultiplier – a novel sensor for the detection of scintillation light // Proc. IEEE. NSS-MIC Conference. 2009. P.2383.
2. Garutti E. Silicon photomultipliers for high energy physics detectors // J. of Instrumentation. 2011. V.6, P.10003.
3. Marano D., et. al. Silicon photomultipliers electrical model extensive analytical analysis // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V.61. No.1. P.23-34.
4. Egorov A.N., Chumakov A.I., Mavritskiy O.B., et. al. Femtosecond laser simulation facility for SEE IC testing // IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). 2014. P.247-250.

Е.В. КАЛАШНИКОВ

*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.*

## **ЦИФРОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР**

Предложен цифровой высокочувствительный светосильный поляризационный интерферометр, позволяющий измерять пространственные распределения изменений показателя преломления прозрачных сред в видимой области спектра благодаря возможности изменения ширины и наклона интерференционных полос.

E. V. KALASHNIKOV

*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region*

## **DIGITAL POLARIZATION INTERFEROMETER**

A digital high-sensitivity polarization interferometer with large aperture is proposed. Its ability to vary the width and tilt of interference fringes enables to measure spatial distribution of changes of the transparent media refractive index in the visible spectrum.

Высокочувствительный светосильный поляризационный интерферометр предназначен для измерения изменений показателя преломления прозрачных сред, возникающих в результате внешних воздействий, и может быть использован при исследовании воздействия на оптические материалы высокоскоростных потоков частиц различного происхождения, а также потоков мощного электромагнитного излучения.

На рис. 1 приведена схема поляризационного интерферометра, где 1 - источник света, 2 - объектив осветительного узла, 3 - поляризатор, 4 - разделитель интерферирующих пучков, вырезанный из одноосного кристалла, 5 - анализатор, 6 - цифровое фотоприёмное устройство, 7 - исследуемый объект; AA - оптическая ось интерферометра; OX, OY, OZ, O'X', O'Y', O'Z', - координатные оси; XOY - плоскость просвечивающего сечения, YOZ, XOZ - меридиональная и сагиттальная плоскости, перпендикулярные плоскости XOY; X'O'Y' - плоскость регистрации интерферограммы; b - ширина интерференционной полосы;  $\alpha$  и  $\varphi$  - углы наклонов разделителя интерферирующих пучков в плоскостях XOZ и YOZ, соответственно;  $\omega$  - угол наклона интерференционных полос.

Конструктивное решение поляризационного интерферометра даёт возможность одновременно изменять ширину и угол наклона

интерференционных полос в плоскости локализации интерференционной картины за счёт изменения плоскости пространственного разделения и величины смещения интерферирующих пучков [1]. Это обеспечивает высокую чувствительность измерений изменения показателя преломления исследуемой среды. Благодаря использованию минимального количества оптических элементов, поглощающих и рассеивающих излучение источника, достигается высокий контраст интерференционной картины при высокой светосиле предлагаемого нами поляризационного интерферометра.

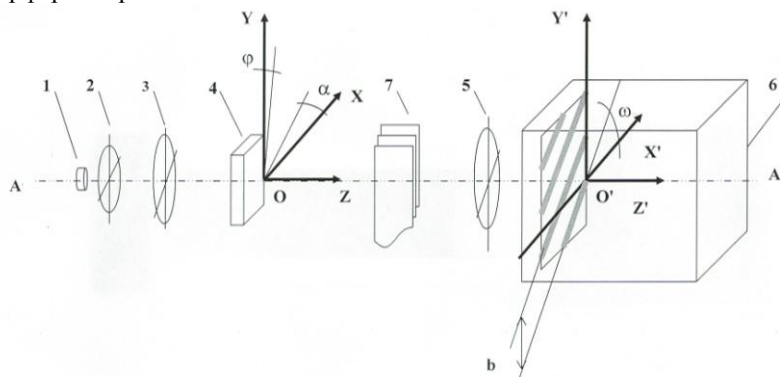


Рис. 1. Схема поляризационного интерферометра

Угол наклона  $\omega$  и ширина интерференционных полос  $b$  определяют ориентацией оптической оси кристалла относительно плоскости  $XOY$  просвечивающего сечения, которую получают поворотом разделителя интерферирующих лучей 4 во взаимно перпендикулярных плоскостях - сагиттальной  $XOZ$  и меридиональной  $YOZ$ . Это позволяет увеличить диапазон изменения ширины интерференционных полос для всех практически значимых ситуаций при исследовании изменения показателя преломления оптических сред в диапазоне  $10^{-2} - 10^{-6}$ .

При проведении испытаний интерферометра в лабораторных условиях уровень влияния тепловых потоков в окружающей среде не превышал уровня чувствительности измерений, что обусловлено, в первую очередь, конструктивными особенностями принципиальной схемы интерферометра и отсутствием неравномерного расширения ветвей интерферометра.

#### Список литературы

1. Патент РФ №2275592 от 31.07.2004.

**В.И. БУСУРИН, Й.Н. ВИН, С.М. СЕМУШЕВА**

*Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)*

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ**

В работе исследованы характеристики кольцевого оптоэлектронного преобразователя угловой скорости, обеспечивающего измерение угловой скорости в диапазоне  $\pm 360$  °/с. Проведен анализ влияния деформации кольцевого резонатора на результаты измерения угловой скорости.

**V.I. BUSURIN, YIN NAING WIN, S.M. SEMUSHEVA**

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **RESEARCH OF THE RING RESONATOR DEFORMATION ON THE MEASUREMENT OF ANGULAR VELOCITY**

In this paper presents the research characteristics of the ring type optoelectronic angular velocity transducer, which can measure angular velocity in the range of  $\pm 360$  °/s. The research of the ring resonator deformation on the measurement results of the angular velocity is shown.

При разработке систем управления летательных аппаратов необходимо использовать данные об угловой скорости, диапазон измерения которой может составлять несколько сотен градусов в секунду. Измерение угловой скорости может быть произведено с помощью кольцевого преобразователя угловой скорости на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ).

При воздействии высокочастотных вибраций на резонатор, например, 26 кГц, кольцо принимает форму эллипса, вытянутого в стороны или вертикально с амплитудой 10 мкм (рис. 1а). Когда устройство подвергается воздействию угловой скорости, на чувствительный элемент (ЧЭ) действует сила Кориолиса, которая является причиной деформации кольца в эллипс, вытянутый вдоль дополнительных осей (рис. 1б), расположенных под углами 45° и 135° относительно главной оси. При отсутствии угловой скорости ЧЭ не изменяют своего положения вдоль дополнительных осей при высокочастотных вибрациях.



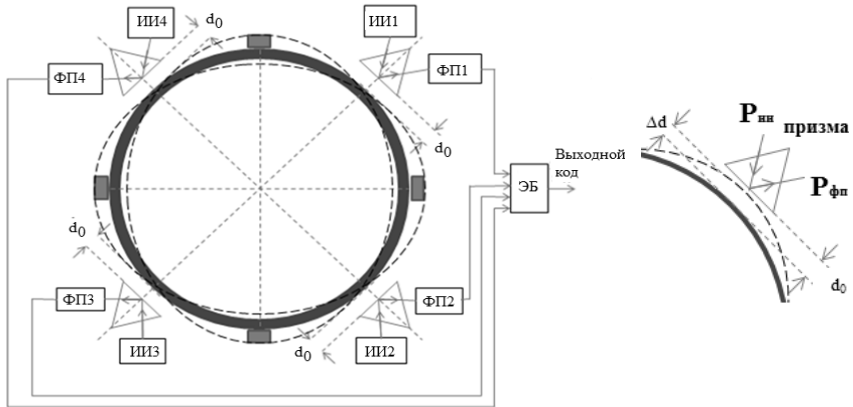


Рис. 1. Кольцевой оптоэлектронный преобразователь угловой скорости (слева), деформирование кольцевого резонатора при угловой скорости (справа)

Для преобразователя угловой скорости для случая полного внутреннего отражения определена зависимость отражательной способности границы раздела от воздействующей угловой скорости. Определены параметры чувствительного элемента преобразователя: диаметр – 2 мм, толщина – 25 мкм, ширина – 75 мкм, начальный зазор  $d_0 = 300$  нм, показатель преломления призмы  $n_1 = 1,5$ , длина волны света  $\lambda = 900$  нм, показатель преломления воспринимающего элемента  $n_3 = 3,4$ , разделительная среда – вакуум ( $n_2 = 1$ ), угол падения  $\theta = 42^\circ$ .

Выходная оптическая мощность  $P_{фп}$  при деформации кольцевого резонатора зависит от угла расположения ЧЭ  $\theta$ , радиальной  $r_e$  и угловой  $\alpha$  координат эллиптической области. [1]. Анализ выходной оптической мощности показал, что погрешность уточненной математической модели составляет не более 1%, относительно приближенной модели без учета влияния деформации резонатора.

#### Список литературы

1. Бусурин В.И., Фам Ань Туан, Ахламов П.С. Анализ влияния конструктивных параметров на характеристики микропто-электромеханического преобразователя угловых скоростей // Труды МАИ. 2015. №81.

**В.И. БУСУРИН, К.А. КОРОБКОВ**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*

## **СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПИЛОТОМ ПРИ ДВИЖЕНИИ НА АЭРОДРОМЕ**

Данная система основана на технологии компьютерного зрения и осуществляет слежение за жестами, подаваемыми маршалом на аэродроме, и на их основе вырабатывает сигналы предупреждения для пилота или экстренные сигналы для бортовой цифровой вычислительной машины летательного аппарата для снижения количества аварийных ситуаций во время движения по аэродрому.

**V.I. BUSURIN, K.A. KOROBKOV**

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

## **DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PILOT WHEN DRIVING AT THE AIRPORT**

This system is based on computer vision technology and provides tracking of gestures fed Marshal at the airport and on the basis generates warning signals for the pilot or emergency signals to the onboard digital computer of the aircraft to reduce the number of accidents occurring during the movement on the airfield.

Система поддержки принятия решения пилота при движении на аэродроме реализуется на основе технологии компьютерного зрения. Данная система предназначена для установки на борту летательного аппарата и осуществляет сканирование окружающей обстановки на наличие полезных жестов, подаваемых маршалом на аэродроме, и, ориентируясь на них, позволяет сообщать пилоту о возникновении аварийной ситуации и, в некоторых случаях, корректировать его действия для избегания их последствий. По результатам анализа технологий захвата движения и распознавания изображений [1], составлено иерархическое древо основных видов систем захвата изображения, таких как маркерные, безмаркерные, механические, оптические, магнитные гироскопические и т.д., наглядно демонстрирующее их схожие и различающиеся свойства. Предложена схема расположения блоков захвата изображения с различными оптическими особенностями на корпусе самолёта – на крыльях, в носовой и хвостовой частях, что позволяет устранить мёртвые зоны.

Разработанная структурная схема системы поддержки принятия решения пилотом при движении на аэродроме обладает универсальностью, модульной архитектурой. Разработаны структурные схемы основных блоков, входящих в состав системы - блока захвата изображения, анализирующего среду на наличие полезной информации, блока обработки информации, управляющего системой, её компонентами и производящего требуемые вычисления, и блока вывода информации, предоставляющего результаты обработки пилоту и посылающего экстренные сигналы в бортовую цифровую вычислительную машину.

Алгоритм функционирования системы для удобства анализа разделён на программные модули, такие как «Сбор и предварительная обработка информации с первичных преобразователей», «Управление узлами блока захвата изображения», «Обработка видеоряда и распознавание жеста», «Отображение информации и сигнализация возникновения ситуации, требуемой вмешательства пилота», и т.д. Алгоритм обмена информацией по высокоскоростным шинам данных позволяет системе обмениваться данными со всеми её частями; алгоритм процедуры обработки видеоряда позволяет системе на основе собранных данных идентифицировать жест и предоставляет пилоту информацию о нём. Эти алгоритмы представлены в виде блок-схем. В среде Matlab была разработана программа обработки видеоданных, полученных с камеры, и анализа жестов, позволяющая распознавать зрительные образы, т.е. выделить объект в принятых изображениях и анализировать жесты на основе вычисления траектории перемещения центра масс объекта наблюдения. Разработан макет, управляемый данной программой и произведено экспериментальное исследование процедуры распознавания жестов.

Результаты моделирования показали правильность функционирования алгоритмов системы. Система способна распознавать образы, как в простых условиях, так и в более сложных, при наличии дополнительных «ложных» источников. Система распознаёт 16 различных жестов. Промоделирована ситуация, когда система воспринимает незнакомый жест, который она пропускает. Выбранная аппаратная реализация обеспечивает системе высокую производительность.

#### *Список литературы*

1. Князь В.В., Бусурин В.И. Автоматическое обнаружение препятствий на взлётно-посадочной полосе средствами технического зрения // 2015. Труды МАИ. №81. С.1-18.

**А.В. ПОЛЯКОВ**

*Белорусский государственный университет, Минск*

## **ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ ПЕРИМЕТРОВАЯ СИСТЕМА ОХРАНЫ**

Представлены результаты разработки частотной оптоэлектронной сигнальной системы, предназначенной для охраны периметров. Система позволяет определить координаты внешних одиночных деформационных воздействий на волоконно-оптическую измерительную сеть и отслеживать их перемещение по контролируемой поверхности.

**A.V. POLYAKOV**

*Belarusian State University, Minsk*

## **OPTOELECTRONIC PERIMETER SECURITY SYSTEM**

The results of design frequency optoelectronic signal system intended for perimeters protection are submitted. The system allows to determine the coordinate of external solitary deformation influences on the fiber-optical measuring network and to trace their moving on a controllable surface.

Перспективным является использование волоконно-оптических сигнальных датчиков в системах охраны периметра для защиты подходов к объектам или запретных зон. Оптический кабель располагается вдоль границы охраняемого периметра и маскируется защитным покрытием. Сенсор обнаруживает изменения давления, вызываемые идущим или ползущим человеком. К преимуществам волоконно-оптических систем можно отнести их невосприимчивость к воздействию электромагнитных и радиочастотных помех, а также грозовых разрядов, что уменьшает вероятность ложной тревоги. Сенсорные кабели не излучают электромагнитной энергии и их трудно обнаружить с помощью поисковой техники. Целью создания предлагаемой волоконно-оптической сигнальной системы является определение в режиме реального времени места внешнего деформирующего воздействия на контролируемую поверхность и отслеживание его перемещения по этой поверхности. Данная система позволяет не только установить сам факт нарушения периметра, но и локализовать место нарушения. Такой результат достигается за счет применения WDM-технологии спектрального разделения информационных каналов. В качестве дискретного датчика используется квазираспределенная оптоэлектронная рециркуляционная

система. Для увеличения разрешающей способности без изменения количества ортогональных волоконно-оптических измерительных линий предлагается использовать специальную конструкцию чувствительного элемента, состоящую из набора каркасных сеток с различной ячеистой структурой, волоконных световодов и упругой основы. С целью наилучшей передачи деформирующего воздействия получены оптимальные значения диаметров элементов упругости и размеров ячеек каркасных сеток в зависимости от шага укладки волоконного световода. Поперечные деформации оптоволокна вызывают избыточные потери мощности излучения и изменение показателя преломления сердцевины волокна. Это приводит к изменению периода рециркуляции, регистрируемому с высокой точностью. Волоконный кабель разделен на секции длиной 1 км с помощью селективных отражателей, в качестве которых выступают аподизированные волоконные брэгговские решетки с различными периодами, способные отражать излучения на разных длинах волн. Изменение временных интервалов регистрировались с использованием метода время-амплитудного преобразования с последующим занесением результатов в многоканальный амплитудный анализатор (МАО).

Разработана математическая модель изменения временных интервалов между циркулирующими импульсами в зависимости от величины микродеформаций волоконного световода с прямоугольным профилем показателя преломления. Данная модель учитывает возникновение дополнительных потерь в зависимости от радиуса изгиба, угла изгиба, вероятности туннелирования излучения из сердцевины в оболочку и параметров самого кварцевого волокна. В результате численного моделирования получены значения радиусов микродеформаций, обеспечивающих работу порогового решающего устройства на линейном участке фронта импульса для многомодового волоконного световода при различных соотношениях между показателями преломления сердцевины и оболочки волокна. Показано, что при фронте импульса 10 нс для идущего нарушителя дополнительное увеличение временного интервала будет составлять 5 нс, что при разрешении 20 пс для одного канала МАО приведет к смещению максимума гистограммы распределения на 250 каналов. Система позволяет обнаруживать идущего или ползущего нарушителя, а также регистрировать попытки подкопа под линией периметра. Подобные системы могут использоваться для охраны периметров таких объектов как аэропорты, ядерные реакторы, электростанции, склады и другие протяженные территории.

К.А. ГОЛУБЕВ<sup>1</sup>, Е.В. КАЛАШНИКОВ, А.В. ЧАРУХЧЕВ  
*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения,  
Сосновый Бор, Ленинградская обл.  
<sup>1</sup>ЗАО «Мастер-ФИТ», Санкт-Петербург*

## **ВИДЕОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА РАБОЧЕГО МЕСТА СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ**

Описана видеоизмерительная система опытного образца прецизионного сборочного модуля соединения деталей в узел для контроля и измерений на межоперационных и финишных этапах сборки положения деталей с размерами элементов до 2 мкм.

К.А. GOLUBEV<sup>1</sup>, E.V. KALASHNIKOV, A.V. CHARUKHCHEV  
*Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor,  
Leningrad region  
<sup>1</sup>JCK "Master-FIT", Saint Petersburg*

## **VIDEO MEASURING SYSTEM FOR ASSEMBLING WORK PLACE**

A video measuring system designed to monitor position of members with elements up to 2 μm at interoperational and final stages of assembly for a pilot assembling module in the process of the members coupling is described.

В работе используются результаты разработок видеоизмерительных устройств фирмы ALICONA, а также ООО «ОПТРОТЕХ». В состав видеоизмерительной системы входят: оптический цифровой автоматизированный измеритель с двухкоординатным автоколлиматором (ОПТРО-ППС-031А) – 2 шт.; оптический цифровой автоматизированный измеритель (Alicona Sensor R25) – 1 шт.

Для бесконтактного измерения параметров контура и формы деталей был использован датчик Alicona Sensor R25 [1]. Комплект поставки измерительного программного обеспечения Alicona обеспечивает расширенные функции для анализа 3D поверхностей. А целый ряд программных опций обеспечивают надежность и стабильность при измерениях контура и шероховатости поверхности. IF-MeasureSuite группируется с соответствующим программным пакетом IF-LaboratoryMeasurementModule для создания 3D данных из точек, измеренных с высокой плотностью и точностью. Создав базу данных 3D

по конкретной детали, программа позволяет хранить в ней все последующие сканы и результаты измерений. Все соответствующие программные модули, включая лицензии, могут быть запущены напрямую из интерфейса IF-MeasureSuite.

**Измерение формы поверхности.** Этот измерительный модуль позволяет производить оценку формы по выбранному пользователем 2D профилю согласно ISO 5436. В дополнение к оценке радиусов, углов и расстояний этот модуль позволяет производить расширенный контроль параметров кромки отверстий с размерами элементов до 2 мкм.

**Измерение контура.** Модуль позволяет оценить профиль поверхности при сечении измеренного облака точек различными геометрическими элементами: плоскостью, спиральной плоскостью, полилинией.

**Измерение 3D формы.** Этот модуль используется для измерения параметров с простой геометрией: плоскости, цилиндры, сферы конусы.

**Сравнение полученной формы с математической моделью.** Модуль предназначен для сравнения двух облаков точек. С помощью него можно вычислить отклонение измеренной формы от её математической модели.

При использовании **оптического цифрового измерителя ОПТРО-ППС-031А** в полуавтоматическом режиме измерений используется марка с центрально-симметричным рисунком, нанесенная на грань зеркального уголка сборочного модуля рабочего места. Зеркальный уголок играет одновременно роль светящейся метки и базы, которая связывает два ортогонально расположенные относительно друг друга измерителя ОПТРО-ППС-031А и измеритель Alicona Sensor R25 в единую видеоизмерительную систему. Выполнение всех измерительных процедур с использованием оптического цифрового измерителя ОПТРО-ППС-031А основано на цифровой обработке изображения марки на матрице ТВ камеры. При этом цифровая технология позволяет использовать множество уровней усреднения результатов измерения. В частности, это усреднение результатов измерения координат центра для всей совокупности окружностей изображения марки в каждом зарегистрированном кадре; усреднение результатов измерения в единичном измерении для заданной совокупности кадров; усреднение результатов измерения для заданной совокупности единичных измерений; усреднение результатов измерений для заданной совокупности фокусов оптической системы ОПТРО-ППС-031А.

*Список литературы*

1. Прибор Alicona InfiniteFocus SL. [www.metrologi.ru](http://www.metrologi.ru)
2. Патент РФ № 112396, 2012.

Н.В. БАРЫШНИКОВ, Д.Г. ДЕНИСОВ,  
В.Е. КАРАСИК, А.А. САХАРОВ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

**МЕТОД И АППАРАТУРА АТТЕСТАЦИОННОГО  
КОНТРОЛЯ РАДИУСОВ КРИВИЗНЫ СФЕРИЧЕСКИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ  
ПРИ ПОМОЩИ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА**

Обсуждается актуальная задача современного метрологического обеспечения в оптических технологиях, связанная с аттестационным контролем радиусов кривизны вогнутых сферических деталей, включая крупногабаритные астрономические зеркала. Приводится оригинальное схемотехническое решение по реализации метода контроля и аппаратуры на его основе с применением датчика волнового фронта, типа Шака – Гартмана. Анализируются точностные характеристики стендовой аппаратуры, включающей в свой состав измерительный оптико-электронный прибор и контролируемые зеркала с различными конструктивными характеристиками.

N.V. BARYSHNIKOV, D.G. DENISOV,  
V.E. KARASSIK, A.A. SAKHAROV

*Bauman Moscow State Technical University*

**METHODS AND EQUIPMENT CERTIFICATION  
CONTROL THE RADIUS OF CURVATURE  
OF THE SPHERICAL SURFACE OPTICAL  
PRODUCTS WITH WAVEFRONT SENSOR**

The article discusses the actual problems of modern metrological maintenance in optical technologies related to certification control of the radii of curvature of the concave spherical parts, including large astronomical mirrors. Is the original circuit solution for the implementation of the control method and apparatus based on it using a wavefront sensor, such as the Shack-Hartmann. We analyze the accuracy characteristics bench apparatus includes at measuring optoelectronic devices and controlled mirrors with different design characteristics.

В современном оптическом производстве контроль параметров формы и радиусов кривизны оптических поверхностей –одна из важнейших метрологических задач оптического производства, для реализации, которой широко используют интерференционные методы и аппаратуру



[1]. Тем не менее, современные интерферометры не лишены ряда недостатков, а именно: наличие высокоточной эталонной поверхности, ограниченный диапазон измерений, большая длина когерентности при диагностике крупногабаритных изделий, применение корректоров волнового фронта при контроле асферических профилей, ограничения по точности измерения набора изделий при одном эталонном, наличие вибраций в условиях лабораторных и цеховых измерений.

Для решения перечисленных задач в работе предлагается использование оптико-электронной системы (рис. 1) на основе схемы с совмещёнными оптическими ветвями (схемы типа интерферометра Физо) для контроля параметров формы и радиуса кривизны оптических изделий на основе датчика волнового фронта (ОЭСДВФ) [2].

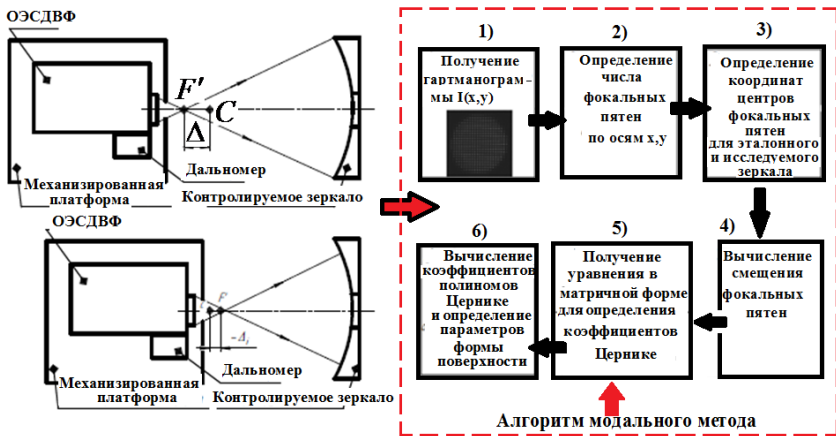


Рис. 1. Функциональная схема оптико-электронного прибора и основные этапы модального метода обработки гартманнограммы: 1 – источник излучения с микрообъективом; 2, 6 – точечная диафрагма; 3 – светоделитель; 4, 7 – объектив; 5 – плоская контролируемая деталь; 8 – ДВФ

#### Список литературы

1. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2010.
2. Neal D.R., O'Hern T.J., Torczynski J.R., Warren M.E., Shul R. Wavefront sensors for optical diagnostics in fluid mechanics: application to heated flow, turbulence and droplet evaporation // Proc. SPIE. 1993. P.194-203.

М.А. ВОЛЫНСКИЙ, И.С. СИДОРОВ, А.А. КАМШИЛИН  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА НА ЕГО МОДУЛЯЦИЮ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖИВОЙ ТКАНЬЮ**

В работе проведено экспериментальное сравнение сигналов двумерной фотоплетизмографии, зарегистрированных синхронно в поляризованном и неполяризованном свете. Показано, что использование поляризованного освещения биоткани не оказывает существенного влияния на информационные составляющие сигнала на частоте сердцебиения.

M.A. VOLYNSKY, I.S. SIDOROV, A.A. KAMSHILIN  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **INFLUENCE OF LIGHT POLARIZATION ON ITS TEMPORAL MODULATION WHILE IT INTERACTS WITH BIOLOGICAL TISSUE IN-VIVO**

In this paper, experimental comparison of imaging photoplethysmography signals registered in polarized and non-polarized light synchronously is carried out. It is shown that there is insignificant difference between polarized and non-polarized illumination of biological tissue in-vivo concerning AC-signal modulation at the heartbeat frequency.

При исследовании внутренней микроструктуры биотканей бесконтактными оптическими методами рекомендуется (см., например, [1]) освещать биоткань поляризованным светом и регистрировать отраженную компоненту излучения с перпендикулярным направлением поляризации по отношению к падающему на биоткань излучению. Мотивация такого подхода состоит в исключении отраженной непосредственно от поверхности биоткани компоненты излучения. При использовании метода двумерной фотоплетизмографии (ФПГ) [2] информацию о пульсациях крови несут амплитуда и фаза регистрируемого сигнала, в то время как отражение от поверхности вносит вклад лишь в фоновую составляющую. В настоящей работе проведено экспериментальное сравнение сигналов ФПГ, зарегистрированных синхронно в поляризованном и неполяризованном свете.

В эксперименте использовалось два светодиода с длиной волны 530 нм, один из которых был снабжен поляридом. Регистрация сигналов проводилась с помощью видеокамеры с поляридом со скрещенной по отношению к поляриду осветителя осью. Запись видеок кадров производилась на частоте 60 Гц, при этом осветители включались по очереди синхронно с регистрацией видеок кадров так, что в зарегистрированной видеопоследовательности четные кадры содержали сигнал в поляризованном свете, а нечетные – в неполяризованном. Объект (рука человека) регистрировался через стекло в контакте с ним (под воздействием груза массой 1,2 кг) [3].

В результате проведенного эксперимента установлено, что использование поляризованного излучения практически не влияет на амплитуду пульсаций (см. пример на рис. 1). Разница амплитуд сигналов, записанных в поляризованном и неполяризованном свете, составляет не более 30%.

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии необходимости использовать поляризованное излучение при исследовании пульсаций крови методом двумерной фотоплетизмографии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 15-15-20012).

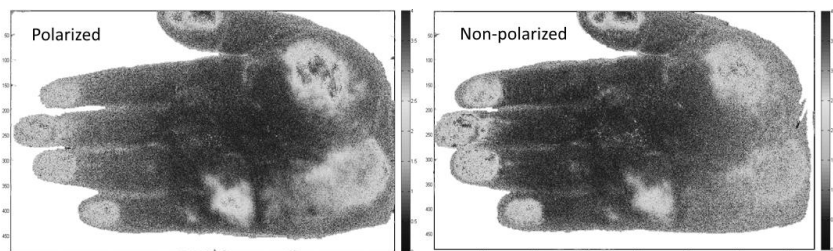


Рис. 1. Распределение амплитуды пульсаций в поляризованном и неполяризованном свете

#### *Список литературы*

1. O'Doherty J., McNamara P., Clancy N.T., Enfield J.G., Leahy M.J. Comparison of instruments for investigation of microcirculatory blood flow and red blood cell concentration // J. Biomed. Opt. 2009. V.14. P.034025.
2. Kamshilin A.A., Miridonov S., Teplov V., Saarenheimo R., Nippolainen E., Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution // Biomed. Opt. Express. 2011. V.2. P.996-1006.
3. Kamshilin A.A., Nippolainen E., Sidorov I.S., Vasilev P.V., Erofeev N.P., Podolian N.P., Romashko R.V. A new look at the essence of the imaging photoplethysmography // Sci. Rep. 2015. V.5. P.10494.

А.В. БЕЛАВЕНЦЕВА<sup>1</sup>, Р.В. РОМАШКО<sup>1,2</sup>, Ю.Н. КУЛЬЧИН<sup>1,2</sup>,  
А.А. КАМШИЛИН<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток*

<sup>2</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

<sup>3</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ МЕТОДОМ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПУЛЬСАЦИИ КРОВИ**

В работе приведены результаты исследования процесса термической релаксации живых тканей методом визуализации пульсации крови.

A.V. BELAVENTSEVA<sup>1</sup>, R.V. ROMASHKO<sup>1,2</sup>, Yu.N. KULCHIN<sup>1,2</sup>,  
A.A. KAMSHILIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok*

<sup>2</sup>*Far Eastern Federal University, Vladivostok*

<sup>3</sup>*ITMO University, Saint Petersburg*

## **THE RESEARCH OF THE THERMAL RELAXATION PROCESS OF LIVING TISSUE BY THE METHOD OF BLOOD PULSATION IMAGING**

This paper presents the results of research of the thermal relaxation process of living tissue by the method of blood pulsation imaging.

Система микроциркуляции крови - одна из тех систем в организме человека, где различные болезни проявляются на ранних стадиях, поэтому существует необходимость в применении новых, простых и доступных методов мониторинга состояния микроциркуляции крови. Одним из таких методов является метод визуализации пульсации крови, где пульсационная составляющая сердечнососудистой системы используется как источник информации [1].

В настоящей работе с помощью метода оптической визуализации пульсации крови проведено исследование процессов термической релаксации живых тканей. В ходе настоящего исследования записаны экспериментальные данные с ладони у 10 субъектов. На рис. 1 представлено распределение амплитуды пульсации крови по ладони, где для исследуемых областей А и В получены сигналы пульсации крови,

указанные на рис. 2. Ногтевая фаланга указательного пальца (исследуемая область В) была предварительно охлаждена до  $23^{\circ}\text{C}$ , остальная часть руки (исследуемая область А) температурному воздействию не подвергалась, и ее температура равнялась  $34,2^{\circ}\text{C} - 34,6^{\circ}\text{C}$  (BPS (blood pulsation signal) – сигнал пульсации крови; T – температура в области контакта ногтевой фаланги пальца и стеклянной подложки; t – время исследования).

Экспериментально показано, что амплитуда пульсации крови зависит от термического воздействия на ткани. Процесс охлаждения тканей приводит к падению амплитуды пульсации крови, а процесс нагревания тканей сопровождается ростом амплитуды пульсации крови. Характер процесса термической релаксации у разных людей протекает одинаково, но, в силу физиологических особенностей организма, параметры процесса релаксации (скорость, амплитуда пульсации, и др.) различаются.

Работа выполнена при поддержке Научного фонда ДВФУ (грант № 13-06-0329-м\_а).

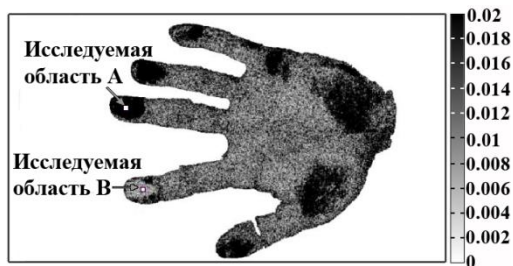


Рис. 1. Распределение амплитуды пульсации крови

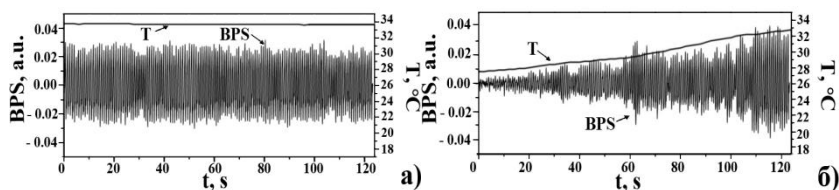


Рис. 2. Эволюция сигнала пульсации крови в области А(а) и В(б) и температура в данных областях

#### Список литературы

1. Kamshilin A.A., Miridonov S., Teplov V., Saarenheimo R., Nippolainen E., Photoplethysmographic imaging of high spatial resolution // Biomed. Opt. Express. 2011. V.2. P.996-1006.

А.А. УХОВ, Д.К. КОСТРИН,  
В.А. ГЕРАСИМОВ, Л.М. СЕЛИВАНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет*

## ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ ОПТИЧЕСКИ ПРОЗРАЧНЫХ ПЛЕНОК

В работе рассмотрен способ повышения точности измерения толщины тонких оптически прозрачных пленок с применением спектрометрического оборудования.

A.A. UHOV, D.K. KOSTRIN,  
V.A. GERASIMOV, L.M. SELIVANOV  
*Saint Petersburg State Electrotechnical University*

## OPTIMIZATION OF METHOD FOR DETERMINATION OF THE THICKNESS OF THIN OPTICALLY TRANSPARENT FILMS

In the paper method of increasing accuracy of thickness measurement of thin optically transparent films with the use of spectrometric equipment is shown.

Для расчета параметров пленок используются известные выражения [1]. В общем случае показатель преломления материала пленки и подложки имеет дисперсию, зависящую от длины волны излучения. Следовательно, для определения толщины необходимо использовать не константы, а значения, вычисленные для каждой длины волны [2]. Для этого необходимо определить положение экстремумов на спектре отражения, либо пропускания пленки. Для получения данных о



Рис. 1. Спектр отражения пленки

фактическом показателе преломления во всем спектральном диапазоне строятся огибающие по найденным максимумам и минимумам спектров (рис. 1).

При построении огибающих необходимо учесть, что количество экстремумов зависит от толщины пленки и может быть не велико. Затем, по построенным огибающим в

зависимости от типа спектра строится зависимость показателя преломления от длины волны.

«Классический» способ поиска максимума или минимума на спектрах отражения, либо пропускания приводит к значительным ошибкам ввиду наличия шума на достаточно пологих экстремумах. Например, два спектра отражения одной и той же пленки на стеклянной подложке при поиске одного из максимумов дали результаты 723,6 нм и 730,7 нм. Такой значительный разброс (7 нм) при измерении положения экстремума приводит к серьезным ошибкам измерения толщины пленки. Увеличить точность измерения, снизив влияние шума, можно с помощью расчета положения центра тяжести пика и построения теоретического спектра осцилляции в пленке, что в данном случае уменьшает разброс значений для двух экспериментов с одной и той же пленкой до 0,3 нм. На рис. 2 представлено окно программы с результатами расчета толщины пленки.

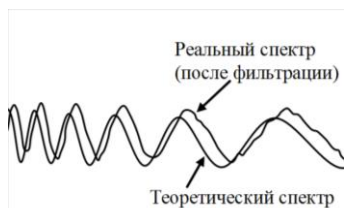


Рис. 2. Измерение толщины пленки по спектру отражения

Наличие шумов в реальном спектре означает, что интегральная разница реального спектра с теоретическим никогда не будет нулевой, однако она может быть минимизирована по мере приближения формы теоретического спектра к форме реального. Для этого необходимо построить несколько теоретических спектров. Для каждого из построенных теоретических спектров необходимо вычислить интегральную разницу с реальным спектром и сравнить их между собой. В результате спектр с минимальной интегральной разницей между реальным и теоретическим спектрами даст наиболее точный результат толщины пленки.

Предложенная методика была проверена также с помощью эллипсометра, показавшего значение толщины тестовой пленки 1,21 мкм. Результат вычислений по спектру дал значение толщины образца 1,22 мкм, что дает отклонение от эллипсометрии примерно 1 %. Таким образом, проведенные исследования и разработанная методика позволили минимизировать влияние шумов реального спектра на результаты измерений параметров пленки, существенно повысив точность расчетов.

#### Список литературы

1. Ayadi K., Haddaoui N. // J. of Mater. Sc.: Mater.s in Electr. 2000. V.11. №2. P.163–167.
2. Барыбин А.А., Шаповалов В.И. Пленки оксидов переходных металлов: физика и технология реактивного распыления. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.

Р.Н. ЧИГРИН, Н.В. АНДРЕЕВА, О.В. АНДРЕЕВА  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ХРАНЕНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ**

В работе представлены результаты исследования процесса седиментации водных суспензий тонкодисперсного кварца методом цифровой голографической интерферометрии и динамического рассеяния света.

R.N. CHIGRIN, N.V. ANDREEVA, O.V. ANDREEVA  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **RESEARCH OF PHASE CHANGES IN PROCESS OF STORAGE OF FINE AQUEOUS SUSPENSIONS OF INORGANIC SUBSTANCES**

The results of research of process of sedimentation of aqueous suspensions of fine quartz by method of digital holographic interferometry and dynamic dispersion of light are presented.

Существует ряд методов характеризации параметров мелкодисперсных неорганических суспензий [1]: сканирующая электронная и зондовая микроскопия, динамическое рассеяние света, рентгеновская дифрактометрия. Каждый из этих методов обладает определенными недостатками и противоречиями, и, как правило, нуждается в дополнительных подтверждениях полученных результатов. Актуальной задачей является разработка новой методики с использованием стандартных оптических схем и приборов, позволяющая повысить достоверность результатов измерений, полученных другими методами. Объектом исследования являются водные суспензии тонкодисперсного кварца, полученные различными способами. Частицы в суспензии №1 получены методом конденсации  $\text{SiO}_2$  из газовой фазы, частицы в суспензии №2 получены из твердой фазы методом измельчения на планетарно-центробежных мельницах.

В работе исследуется возможность оценки параметров таких суспензий методом цифровой голографической интерферометрии [2,3] (ЦГИ) в процессе их хранения. Хранение суспензий сопровождается седиментацией частиц твердой фазы и их фракционированием по высоте



столба жидкости [4]. Контроль распределения частиц по размерам производился методом динамического рассеяния света на приборе Horiba LB-550. На рис. 1а и 1б приведено распределение частиц по размерам в исследуемых суспензиях в разные моменты хранения.

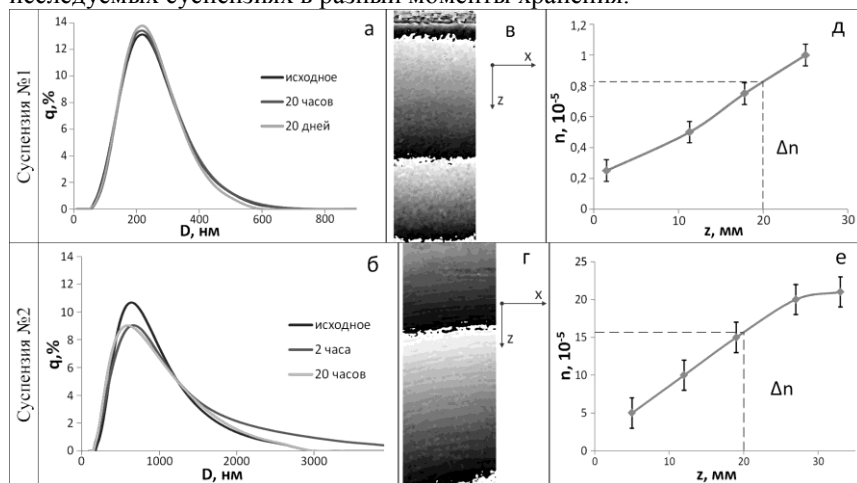


Рис. 1. Распределение частиц по размерам в определенные моменты процесса седиментации суспензии №1 (а) и №2 (б); интерферограммы при седиментации в течение 72 часов (в) и 24 часа (г); изменение показателя преломления суспензии по высоте столба жидкости (д,е)

Методом ЦГИ получены интерферограммы (рис.1в и 1г), обработка которых позволила оценить изменение показателя преломления (дельта n) по высоте столба жидкости в заданный момент седиментации по сравнению с исходным состоянием суспензии (рис.1д и 1е). Полученные результаты демонстрируют высокие возможности метода ЦГИ при оценке фазовых изменений тонкодисперсных суспензий, которые значительно превышают возможности метода динамического рассеяния.

#### Список литературы

1. Кириллова С.А., Смирнов А.В., Федоров Б.А. и др. Морфология и размерные параметры нанокристаллов бемита, полученных в гидротермальных условиях // Наносистемы: физика, химия, математика. 2012. Т.3(4). С.101-113.
2. Manukhin B., Chivilikhin S., Vinogradova G., Gusev M., Andreeva O. Study of thermal effects in transparent objects by digital holography methods // JPCS. 2014. V.536(1). P.012007.
3. Pedrini G., Osten W., Gusev M. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement // Applied optic. 2006. V.45. No.15. P.3456-3462.
4. Xue B., Sun Y. Modeling of sedimentation of polydisperse spherical beads with a broadsize distribution // Chemical Engineering Science. 2003. V.58. P.1531-1543.

Н.С. БАЛБЕКIN, М.С. КУЛЯ, А.А. ГОРОДЕЦКИЙ<sup>1</sup>,  
Е.В. НОВОСЕЛОВ<sup>2</sup>, Н.В. ПЕТРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>1</sup>*Университет Астон, Бирмингем, Великобритания*

<sup>2</sup>*Технический университет Чалмерса, Гётеборг, Швеция*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ГОЛОГРАММ С ШУМОМ**

В работе продемонстрирован результат восстановления цифровых широкополосных импульсных голограмм с добавлением шума во время записи с целью эмуляции реальных условий записи. Показана степень применимости алгоритмов фильтрации данных после регистрации и в процессе восстановления фазовых терагерцовых голограмм. Приведено сравнение электронных линейных фильтров Баттерворта и Чебышева, применяемых к одномерным массивам данных, с фильтрами, применяемыми к 2-D изображениям терагерцовых широкополосных импульсных полей на различных частотах. 2-D фильтры рассмотрены на примере фильтра «sin-cos».

N.S. BALBEKIN, M.S. KULYA, A.A. GORODETSKY<sup>1</sup>,  
E.V. NOVOSELOV<sup>2</sup>, N.V. PETROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

<sup>1</sup>*Aston University, Birmingham, UK*

<sup>2</sup>*Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden*

## **THE MODELLING OF BROADBAND PULSE HOLOGRAMS WITH NOISE**

In this work, we show the result of the reconstruction of digital broadband pulse holograms with the noise addition during recording stage. The applicability of algorithms of data filtering after the registration or at reconstruction of the phase terahertz (THz) holograms is shown. Comparison of standard signal processing linear filters Butterworth and Chebyshev, which are applied to 1-D data, with filters that are applied to 2-D images of terahertz broadband pulse fields at various frequencies (the «sin-cos» filter) is given.

В методе широкополосной импульсной терагерцовой голографии с разрешением во времени (THz PTDH) [1] можно применять алгоритмы подавления шумов как непосредственно после регистрации голограммы, так и после распространения изображения в плоскость объекта. Особенности дифракционного распространения терагерцового

широкополосного импульсного поля были исследованы в [2]. Для подавления шумов в спектральном распределении фазы мы использовали фильтр Баттерворта [3] и фильтр Чебышева 1 рода [4]. Далее, для сравнения, к восстановленным изображениям ТГц голограммы был применен фильтр «sin-cos» [5, 6] на частотах 0,01 – 2 ТГц с шагом 10 ГГц. После чего было проведено сравнение эффективности алгоритмов шумоподавления, примененных до и после восстановления голограммы.

Поскольку в методе ТГц РТДН основная информация содержится в фазе ТГц волны, эффективным оказывается применение методов фильтрации для спектрального распределения фазы на этапах записи и обратного распространения, в отличие от подхода, предусматривающего применение фильтров к пространственному распределению амплитуды и фазы полученных изображений. Фильтры, работающие с пространственным распределением амплитуды и фазы изображений, теряют пространственное разрешение вследствие использования алгоритмов сглаживания соседних пикселей. В нашем случае фильтрация происходит в спектральном распределении фазы независимо в каждом пикселе. Применимость данного метода обусловлена использованием импульсного широкополосного терагерцового излучения, что добавляет преимуществ импульсной голографии в сравнении с непрерывной.

Петров Н.В. благодарит за поддержку министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания. Работа выполнена в рамках государственного задания №3.1675.2014/К Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### *Список литературы*

1. Petrov N.V., Gorodetsky A.A., Bepalov V.G. // Proc. SPIE. 2013. V.8846. P.88460S.
2. Balbekin N.S., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.49-53.
3. Gaikwad K.M. // 2014 IEEE Global conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN) Removal, 2014. P.121-124.
4. Zhu Y.-Z., Guan K. // 2010 International Conference on Communications and Mobile Computing. IEEE, 2010. P.98-102.
5. Huntley J.M. // Opt. Lasers Eng. 1997. V.26(2-3). P.131-150.
6. Aebischer H.A., Waldner S. // Opt. Commun. 1999. V.162(4-6). P.205-210.

**А.Н. БОРОДИН**

*Байкальский государственный университет экономики и права, Иркутск*

## **РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА С УГЛОВЫМ СЕЛЕКТИВНЫМ ПРОПУСКАНИЕМ**

В работе рассмотрена проблема углового селективного регулирования светопропускания оптического фильтра. Приведен аналитический расчет характеристик регулирования пропускания фильтра при разных параметрах фильтрующих элементов. Показана возможность адаптации фильтрующей системы к изменению угла падения световых лучей.

**A.N. BORODIN**

*Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk*

## **OPTICAL FILTER CHARACTERISTICS CALCULATION WITH THE ANGULAR SELECTIVE TRANSMISSION**

The article deals with the problem of selective angular adjustment of the optical filter's light transmission. An analytical calculation of the characteristics of regulation for different parameters of the filter elements is given. The possibility of adapting the filtering system to a change in the incidence angle of light rays is shown.

При наблюдении объектов с большим перепадом яркости используется установка перед изображающей системой оптического фильтра с угловой селективностью пропускания для ослабления излучения части поля зрения с целью уменьшения динамического диапазона входного сигнала, согласования его с характеристиками фотоприемного устройства и уменьшения оптических шумов.

В работе получена аналитическая зависимость угловой функции пропускания от размера экрана при разных размерах отверстия, от расстояния между экраном и отверстием, зависимость функции пропускания от смещения экранов и отверстий в направлении перпендикулярном оптической оси (рис. 1). Фильтрующие элементы с угловым селективным пропусканием [1, 2] в различных сочетаниях можно использовать для большинства проблем частичного виньетирования ярких объектов в поле зрения оптической системы. Используя различные соотношения диаметров отверстий и экранов и расстояния между ними, можно расширять возможности оптических систем. Для получения более крутой характеристики фильтра необходимо увеличивать расстояние

между экраном и отверстием. Изменяя соотношение диаметров экрана и отверстия можно менять пропускание в области максимального виньетирования (рис. 2). Комбинируя фильтрующие элементы с различными геометрическими параметрами можно сформировать желаемую зависимость углового пропускания оптической системы.

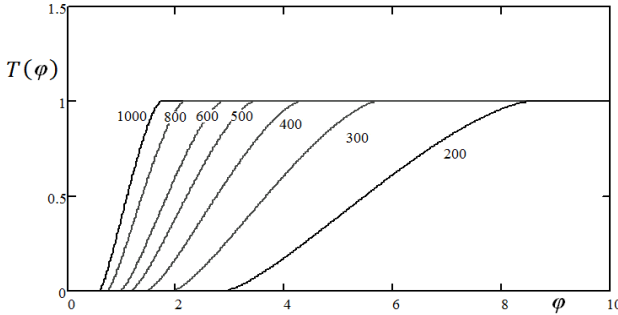


Рис. 1. Зависимость угловой функции пропускания от расстояния между передним экраном и отверстием

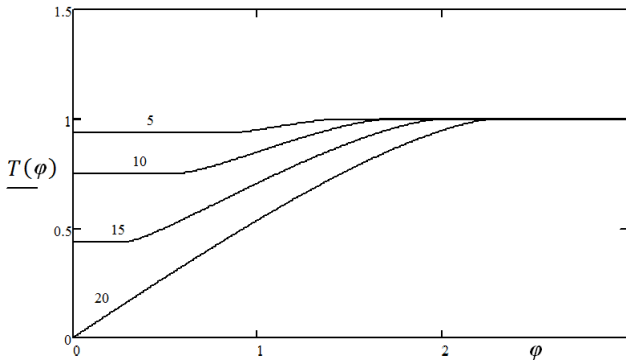


Рис. 2. Зависимость угловой функции пропускания от размера экрана при размере отверстия 20 единиц длины

#### Список литературы

1. Бородин А.Н. Устройство для наблюдения солнечной короны. Патент РФ № 2226707, приоритет от 08 октября 2001 г, зарегистрировано в реестре 10 апреля 2004 г.
2. Закируллин Р. С. Оптический фильтр с угловой селективностью светопропускания // Оптический журнал. 2013. Т.80. №8. С.16–24.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, Е.К. ПЕТРОВА, С.С. ПЬЯНКОВ,  
Р.С. СТАРИКОВ, Д.В. ШАУЛЬСКИЙ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИНТЕЗА  
ИНВАРИАНТНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ  
НА БАЗЕ ИСКУССТВЕННЫХ НАСТРОЕЧНЫХ НАБОРОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЁМ МАНИПУЛЯЦИИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ РЕАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Приводятся результаты исследований по синтезу инвариантных корреляционных фильтров на основе ограниченного числа эталонных изображений.

N.N. EVTIKHIEV, E.K. PETROVA, S.S. PYANKOV,  
R.S. STARIKOV, D.V. SHAULSKIY

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

**RESEARCH OF CORRELATION FILTER SYNTHESIS BASED  
ON ARTIFICIAL TRAINING SETS RECEIVED  
BY THE ADJUSTMENT OF REAL IMAGES**

Results of researches on synthesis of invariant correlation filters based on limited number of reference images are given.

При синтезе инвариантного корреляционного фильтра (КФ) количество изображений в настроечном наборе фильтра (ННФ), используемом определяет качество распознавания, в частности для КФ с минимумом шума и энергии корреляции (МШЭК) [1], используемого в данной работе возможно достижение вероятности правильного распознавания более 99% при использовании НФ из десятков-сотен изображений [2]. На практике, часто, изображения ННФ должны быть получены а-приори фоторегистрацией, при решении ряда практических задач сформировать таким образом ННФ часто затруднительно. Поэтому, определённый интерес представляет подход, основанный на использовании в ННФ изображений, полученных искусственным путём на основе ограниченного количества реальных фотографий. В данной работе для создания таких искусственных изображений из реальных использовались изменения яркости и контраста. В принципе, такой

подход отвечает некоторым практически важным постановкам задачи распознавания, например, задаче распознавания аэрофотоснимков, полученных в разных условиях освещённости и при разных атмосферных условиях.

Было проведено моделирование со следующими параметрами: размер изображений 512x512, 256 градаций серого. В качестве ННФ взяты 9 разных фото одной местности. В качестве результата работы КФ были получены его кросс-корреляции для каждого из исходных изображений, а также для изображения, имеющего низкое качество по разрешению и контрасту. Все изображения, вошедшие в фильтр, дали высокий узкий пик. Для изображения с низким уровнем резкости, пик имеет ту же форму, но ниже.

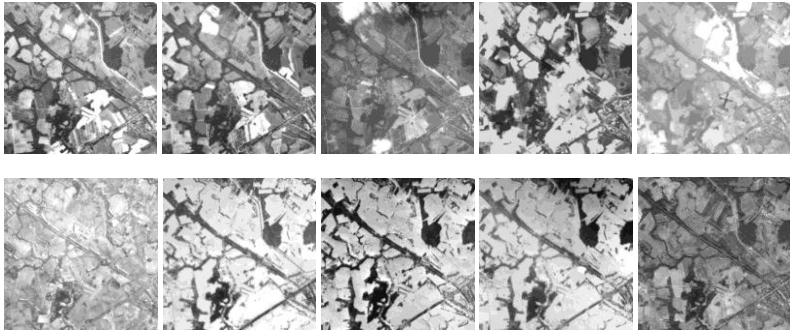


Рис. 1. Эталонные изображения, и изображение с плохими контрастом и резкостью, не использовавшееся при синтезе КФ (нижнее правое)

Был исследован простейший вариант ННФ, составленного с использованием искусственных изображений. КФ был синтезирован на основе набора, в состав которого вошли 3 реальных изображения и по 2 изображения, полученных из них изменением яркости и контраста. Такой КФ обеспечил правильное распознавание всех изображений рис. 1. Таким образом показана принципиальная применимость рассматриваемого метода.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №14-19-01751.

#### *Список литературы*

1. Ravichandran G., Casasent D.P. Minimum noise and correlation energy optical correlation filter // Appl. Opt. 1992. V.31. P.1823-1833.
2. Evtikhiev N.N., Shaulskiy D.V., Zlokazov E.Yu., Starikov R.S. Variants of minimum correlation energy filters: comparative study // Proc. SPIE. 2012. V.8398. P.83980G.

П.В. ПАВЛОВ, А.Н. МАЛОВ<sup>1</sup>, А.В. НЕУПОКОЕВА<sup>1</sup>,  
Т.Ю. НИКОЛАЕВА<sup>2</sup>, Н.В. ПЕТРОВ<sup>2</sup>

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
Воронеж*

<sup>1</sup>*Иркутский государственный медицинский университет*

<sup>2</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ В ОБЪЕМЕ МЕТОДАМИ Пороговой обработки и «ШАХМАТНОЙ ДОСКИ»**

В данной работе рассмотрены методы пороговой обработки изображений и «шахматной доски» для задач статистического анализа распределений частиц. В результате численного исследования проведена оценка эффективности применения алгоритмов пороговой обработки сфокусированных изображений частиц и обработки спекл-изображений методом «шахматной доски» для задачи идентификации частиц в объеме.

P.V. PAVLOV, A.N. MALOV<sup>1</sup>, A.V. NEUPOKOEVA<sup>1</sup>,  
T.Yu. NIKOLAEVA<sup>2</sup>, N.V. PETROV<sup>2</sup>

*Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh*

<sup>1</sup>*Irkutsk state medical university*

<sup>2</sup>*ITMO University, Saint Petersburg*

## **IDENTIFICATION OF PARTICLES IN THE VOLUME BY METHODS OF IMAGE PROCESSING AND «CHESSBOARD»**

In this paper, methods of threshold image processing and «chessboard» method are studied in relate to the problem of statistical analysis of particle distributions. As a result of a numerical study we evaluated effectiveness of proposed methods of threshold processing of focused images of the particles and «chessboard» method of speckle-image processing for the problem of identification of particles in a volume.

Необходимость изучения частиц различной природы, распределенных в объеме среды, возникает во многих научных задачах атмосферной оптики [1], океанографии, биологии и медицины [2], а также в большом количестве практических задач [3].

В данной работе объектом исследования являлось тестовое распределение рассеивающих микрочастиц в объемной среде. Объем моделировался как набор сегментов с распределением частиц необходимого размера и концентрации. В методе, основанном на



оконтуривании и пороговой обработке и подробно изложенном в работе [4], для получения характеристик распределений частиц в объеме обрабатывались сфокусированные изображения частиц, расположенных в различных плоскостях объема. Было продемонстрировано, что данный метод позволяет исследовать объемы с высокой концентрацией частиц.

В данной работе возможности указанного метода сравниваются с методом «шахматной доски» [5], который хорошо зарекомендовал себя в задачах обработки спекл-структур. В ходе ранее проведенных исследований в этой области, метод «шахматной доски» показал очень высокую чувствительность: изменение размера спекла на несколько пикселей, приводит к существенной деформации корреляционных пиков [6]. В связи с этим, интерес представляет определение потенциала данного метода в задачах идентификации частиц в водной среде.

В отличие от методов корреляционного и вейвлет-анализа, метод шахматной доски эффективно использует информацию со всего поля зрения. При этом, основным его преимуществом перед методом оконтуривания и пороговой обработки является меньшая вычислительная сложность, и как следствие, меньшее время обработки данных.

Т.Ю. Николаева выражает благодарность за государственную финансовую поддержку ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), Н.В. Петров благодарит за поддержку Министерство образования и науки Российской Федерации, проект №2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

#### *Список литературы*

1. Воронцкий А.В., Михайлов В.Н., Петров Н.В., Стаселько Д.И. // Оптический Журнал. 2012. Т.79. №1. С.18–24.
2. Kim W.H., et al. // Journal of the Optical Society of Korea. 2010. V.14. No.1. P.42-48.
3. Carter R.M., Yan Y., Tomlins K. // Measurement Science and Technology. 2006. V.17. No.2. P.235.
4. Nikolaeva T.Yu., Petrov N.V. // Optical Engineering. 2015. V.54. No.8. P.083101.
5. Малов А.Н., Неупокоева А.В. // в кн. Голография. Наука и практика. Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо–2013». М.: ООО «МНГС», 2013. С.257-264.
6. Лагошный И.С., Павлов П.В., Малов А.Н., Неупокоева А.В. // XIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов. 2015. С.32-38.

П.В. ПАВЛОВ, И.С. ЛАГОШНЫЙ,  
А.Н. МАЛОВ<sup>1</sup>, А.В. НЕУПОКОЕВА<sup>1</sup>

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина,  
Воронеж*

<sup>1</sup>*Иркутский государственный медицинский университет*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПО ПАРАМЕТРАМ СПЕКЛ-ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ «ШАХМАТНОЙ ДОСКИ»

Рассмотрен способ обработки цифровых спекл-изображений на основе использования метода «шахматной доски», который позволяет анализировать динамику изменения параметров шероховатости.

P.V. PAVLOV, I.S. LAGOSHNYI,  
A.N. MALOV<sup>1</sup>, A.V. NEUPOKOEVA<sup>1</sup>

*Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh  
<sup>1</sup>Irkutsk state medical university*

## DETERMINATION ROUGHNESS PARAMETERS OF THE SPECKLE AN IMAGE USING THE METHOD OF «CHESSBOARD»

A method of processing digital speckle images using the method of «chessboard», which allows us to analyze the dynamics of change of roughness parameters.

Одним из наиболее эффективным методом обработки спекл-изображений, при использовании метода спекл-структур оптического излучения является метод «шахматной доски» [1], так как в процессе оценивания параметров рельефа зондируемого участка задействована информация всего спекл-изображения, что не возможно сказать о методах корреляционного и вейвлет-анализа.

Метод «шахматной доски» позволяет выявить корреляцию элементов (спекл-пятен) изображения с элементами (клетками) шахматной доски. Для простой модели одномерного случая можно определить:

$$t(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{rect} \left( \frac{x}{d_{cn}} + nd_{cn} \right), \quad t(d) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} a_m \text{rect} \left( \frac{x}{d_{u}} + md_{u} \right), \quad (1)$$

где  $t(p)$  – распределение яркостей пикселей спекл-изображения,  $t(d)$  – распределение яркостей пикселей по шахматной доске,  $a_m = 0$ , при четном  $m$   $d_{cn}$  – размер спекл-пятна,  $d_{uu}$  – размер клетки шахматной доски.

Для обработки непрерывного распределения яркостей изображений, описываемых уравнениями (1) необходимо произвести их дискретизацию, для этого используем гребенку Дирака [2] в результате получим:

$$t(p) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_{cn}}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d_{cn}}\right), \quad t(d) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right) * \text{comb}\left(\frac{x}{d_{uu}}\right), \quad (2)$$

где  $*$  – знак операции свертки,  $\text{comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n)$  – гребенка Дирака.

Для нахождения Фурье-спектра дискретных функций (2) воспользуемся Прямым Фурье преобразованием, после получения Фурье спектров необходимо их перемножить, а затем выполнить обратное Фурье преобразование, в результате которого получается функция корреляции спекл-изображения к шахматной доске.

В случае если  $d_{uu} < d_{cn}$  или  $d_{uu} > d_{cn}$ , то при перемножении спектров структура шахматной доски будет неравномерной и начнет съезжаться в цепочку, что отчетливо наблюдается на рисунке 1, при условии изменении параметров шероховатости поверхности  $R_a$  от 0,1 мкм (эталон) до 1,2 мкм.

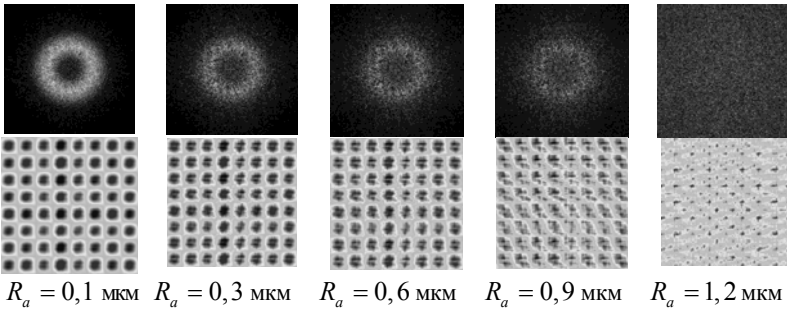


Рис. 1. Корреляционные поля (нижний ряд) полученные при сравнении спекл-картин (верхний ряд) от поверхностей с параметрами  $R_a = 0,1 \dots 1,2$  мкм с регулярной структурой типа «шахматная доска»

#### Список литературы

1. Малов А.Н., Неупокоева А.В., Метод «шахматной доски» для анализа спекл-изображений // в кн. Голография. Наука и практика. Сборник трудов 10-й Международной конференции «ГолоЭкспо-2013». М.: ООО «МНГС», 2013. С.257-264.
2. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970.

М.В. ВОЛКОВ, Ю.В. ВИНОГРАДОВ  
*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ФАЗОВОГО СДВИГА**

В данной работе рассматриваются методы восстановления смещений поверхностей шероховатых объектов с использованием интерференционных методов фазового сдвига. В некоторых интерферометрических системах фазовый сдвиг задаётся с использованием пьезопривода. Это позволяет повысить точность восстановления смещений объектов за счёт увеличения количества измерений. Расшифровка параметров сигнала при этом производится на основе преобразования Фурье-Гильберта. Предложенный метод анализа и отбраковки частично искаженных данных позволяет корректно восстанавливать смещение объектов для данных, полученных в реальных экспериментах.

M.V. VOLKOV, Yu.V. VINOGRADOV  
*ITMO University, Saint Petersburg*

## **EVALUATION OF OBJECT SURFACE SHIFTS WITH USING PHASE SHIFTING INTERFEROMETRY METHODS**

In this paper the methods of object surface shifts recovery are discussed. Some interferometric systems with using PZT phase shifting allows the recovery of objects surface shifts with improved measurement accuracy. Recovery of signal parameters in this case is based on the Fourier-Hilbert transform. The proposed method of analysis and partial rejection of distorted signal data provides useful results for real experiments data.

Одним из важных направлений применения интерферометрических систем является восстановление смещений шероховатых поверхностей объектов [1]. Восстановление смещений поверхностей образцов важно при исследованиях параметров материалов, например, при вычислении модуля Юнга [2] и коэффициента ТКЛР [3] (теплового коэффициента линейного расширения).

При восстановлении параметров материалов во многих случаях требуется восстановление смещений объектов с точностью до нескольких нанометров. Такую точность могут обеспечить интерференционные методы, которые подробно описаны в работе [1]. При этом информация о смещениях объекта содержится в фазе зарегистрированного

интерференционного сигнала и может быть восстановлена при компьютерной обработке данных с использованием преобразования Фурье-Гильберта [4].

Для интерференционных измерений характерна высокая точность измерений, но регистрируемый интерференционный сигнал может быть искажен в одной или нескольких точках из-за случайных помех. В данной работе предложены дополнительные методы обнаружения и отбраковки искаженных участков сигнала. Показано, что данные методы позволяют повысить точность расчётов и помехоустойчивость при восстановлении смещений.

Предложенные методы обработки данных проверены при восстановлении смещений реальных объектов, полученных на установке для измерения ТКЛР. Исследовались образцы корунда (гладкая поверхность, сигнал в виде интерференционных полос), молибдена (шероховатая поверхность) и меди (шероховатая поверхность). Разработанные методы обработки данных обеспечили корректное восстановление смещений в условиях реального эксперимента и восстановление коэффициента ТКЛР, близкого к эталонному значению. При этом обработка данных производилась в несколько раз быстрее ранее используемого для той же задачи метода на основе оптимизации параметров интерференционного сигнала.

Проведённые исследования показывают высокую эффективность разработанных методов восстановления поверхностей по результатам компьютерного моделирования и в условиях реального эксперимента.

#### *Список литературы*

1. Маргарянц Н.Б. Помехоустойчивые интерферометрические системы контроля объектов на основе формирования, регистрации и обработки набора интерференционных картин // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Дата защиты: 21.05.2013. Санкт-Петербург, 2013 г. 20 с.
2. Гужов В.И., Дружинин А.И., Козачок А.Г., Логинов А.В. Измерительно-вычислительная система для анализа напряженно-деформированного состояния объектов // Автометрия. 1982. №4. С.102-103.
3. Компан Т.А., Корнев А.С., Пухов Н.Ф., Гуров И.П., Дудина Т.Ф., Маргарянц Н.Б. Метод спекл-интерферометрии для определения теплового расширения наноматериалов // Измерительная техника. 2011. №4. С.48-52.
4. Гужов В.И., Подъяков А.Е., Солодкин Ю.Н., Штейнгольц З.И. Восстановление фазы волнового фронта на основе одномерного преобразования Фурье // Автометрия. 1992. №6. С.21-24.

Н.А. ТАЛАЙКОВА<sup>1,2</sup>, В.П. РЯБУХО<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского*

<sup>2</sup>*Университет Оулу, Финляндия*

<sup>3</sup>*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

## **КОМПАКТНАЯ СХЕМА ДИФРАКЦИОННОГО ФАЗОВОГО МИКРОСКОПА ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ**

Представлено теоретическое описание схемы компактного дифракционного фазового микроскопа и метод восстановления трехмерной структуры мазка крови человека с малым оптическим увеличением системы.

N.A. TALAIKOVA<sup>1,2</sup>, V.P. RYABUKHO<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>*Saratov State University*

<sup>2</sup>*University of Oulu, Finland*

<sup>3</sup>*Institute of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

## **COMPACT DIFFRACTION PHASE MICROSCOPE FOR 3D VISUALIZATION OF PHASE OBJECTS**

We present new method for 3D visualization of phase objects. We used compact diffraction phase microscope with double Fourier transform algorithm for red blood cells phase map calculation with low magnification.

Дифракционная фазовая микроскопия – метод интерференционной микроскопии, известный своим применением в биологических исследованиях [1]. Проведенные исследования показывают, что метод устойчив к механическим вибрациям, вследствие прохождения обоих световых полей интерферометра через одни и те же оптические элементы [1, 2]. Классическая схема дифракционного фазового микроскопа (ДФМ) представляет собой единую систему, состоящую из оптического микроскопа и дополнительного интерференционного модуля для количественной визуализации фазы исследуемого объекта. Изображение объекта, полученное в оптическом микроскопе, в данной системе переотображается в плоскость дифракционной решетки, которая совпадает с задней фокальной плоскостью тубусной линзы микроскопа и передней фокальной плоскостью первой линзы телескопической  $4-f$  системы интерференционного модуля.

В данной работе исследования проводятся на упрощенной схеме ДФМ, состоящей из когерентного источника освещения, объекта исследования и интерференционного модуля (рис. 1). Восстановление трехмерной структуры фазового объекта в данном методе осуществляется путем извлечения информации о фазовой задержке света при прохождении через объект при регистрации матричным фотодетектором интерференционных картин. Свет при прохождении через дифракционную решетку разлагается на порядки дифракции. В задней фокальной плоскости первой линзы дифракционные порядки представляют набор идентичных спектров, каждый из которых содержит полную пространственную информацию об объекте. Пространственный фильтр SF применяется для исключения всех дифракционных порядков, кроме 0-го и 1-го. Для 0-го дифракционного порядка используется фильтр низких частот, который применяется для формирования опорного пучка, не содержащего высокие пространственные частоты; в 1-ом сохраняются все пространственные компоненты и, следовательно, полная информация об объекте. В соответствии с этим, 1-й дифракционный порядок представляет собой объектное волновое поле. В задней фокальной плоскости линзы L2 дифракционного модуля установлен цифровой датчик изображения, который регистрирует картину интерференции обоих дифракционных порядков.

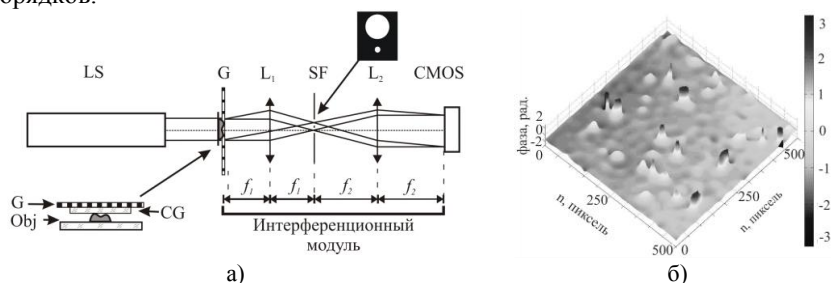


Рис. 1. Оптическая схема компактного ДФМ: LS - источник света, Obj - фазовый объект, CG - покровное стекло, G - дифракционная решетка, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> - линзы, SF - пространственный фильтр, CMOS - детектор излучения (а); восстановленная фазовая карта мазка крови человека; значения фазы представлены в диапазоне от  $-\pi$  до  $\pi$ , развертка фазы не проводилась (б)

#### Список литературы

1. Bhaduri B., et al. Diffraction phase microscopy: principles and applications in materials and life sciences // *Advances in Optics and Photonics*. 2014. V.6. P.57–119.
2. Kalyanov A.L., et al. Formal theory of diffraction phase microscopy // *Proc. SPIE*. 2015. V.9448. P.944817.

А.В. БЕЛАШОВ<sup>1,2</sup>, Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, И.В. СЕМЕНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

## **СЛУЧАЙНЫЕ И СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ**

В работе представлены результаты изучения влияния случайных и систематических ошибок, возникающих в ходе эксперимента, на качество восстановления трехмерного распределения показателя преломления. Исследована возможность улучшения качества восстановления при наличии экспериментальных погрешностей за счет увеличения количества зарегистрированных цифровых голограмм.

A. V. BELASHOV<sup>1,2</sup>, N. V. PETROV<sup>1</sup>, I. V. SEMENOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*ITMO University, Saint Petersburg*

<sup>2</sup>*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint Petersburg*

## **RANDOM AND SYSTEMATIC ERRORS IN DIGITAL HOLOGRAPHIC TOMOGRAPHY**

The paper presents results of investigation of random and systematic errors impact on the reconstruction quality in digital holographic tomography. The effect of the number of processed digital holograms recorded at different angles to the object in presence of noise and experimental errors is studied.

Методы цифровой голографической томографии позволяющие восстанавливать трехмерные распределения показателя преломления исследуемого объекта, широко используются для решения задач неразрушающего контроля неорганических структур [1] и неинвазивного исследования биологических объектов [2]. Быстрое развитие этих методов, привело к разработке алгоритмов позволяющих наблюдать динамику изменения показателя преломления в объекте с высоким пространственным разрешением в реальном времени.

Как правило, в рамках данного подхода вначале производится восстановление и развертка фазовых набегов волнового фронта, прошедшего через исследуемый объект под различными углами. Затем полученные распределения подаются в качестве входных данных в томографический алгоритм [3]. В результате обработки происходит восстановление данных о величине фазового набега в каждой



элементарной ячейке, которые затем могут быть переведены в значения показателя преломления.

В рамках данной работы было исследовано влияние случайных и систематических экспериментальных погрешностей на качество восстановления исходных данных. Для этого было проведено численное моделирование процесса прохождения волнового фронта через объекты с заданным распределением показателя преломления при различных конфигурациях оптической системы, а также процесс записи цифровых голограмм при различных соотношениях сигнал/шум. Затем проводилось восстановление полученных интерференционных картин, а также их последующая обработка с помощью томографического метода обратного распространения [3]. Для контроля качества работы данного алгоритма восстановленные данные сопоставлялись с исходным распределением показателя преломления в моделированных объектах.

В результате было показано, что влияние случайных погрешностей на восстановленные данные может быть значительно уменьшено благодаря увеличению информационного наполнения, то есть за счет регистрации большего количества цифровых голограмм волнового фронта, проходящего через объект под различными углами. Однако появление систематических ошибок в ходе эксперимента может привести к существенным искажениям полученных данных. Подобные ошибки могут возникнуть при несовпадении проекций оси вращения, используемой при восстановлении, с осью вращения объекта или волнового фронта в ходе эксперимента, а также при недостаточно хорошей коллимации предметного пучка.

А.В. Белашов благодарит за государственную финансовую поддержку ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01). Н.В. Петров благодарит за поддержку министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания. И.В. Семенова благодарит Российский научный фонд, грант № 14-13-00266.

#### *Список литературы*

1. Lin Y.-C. and Cheng C.-J. Sectional imaging of spatially refractive index distribution using coaxial rotation digital holographic microtomography // J. Opt. 2014. V.16. P.065401.
2. Choi W., Fang-Yen C., Badizadegan K., Oh S., Lue N., Dasari R.R., Feld M.S. Tomographic phase microscopy // Nat. Methods. 2007. V.4. P.717–719.
3. Kak A.C. and Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging. Philadelphia: PA, 2001.

Д.В. КАМЕНЕВ, А.С. СИНИЦЫН

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ РАЗМЕРОВ  
И ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЧАСТИЦ,  
ВЫЗВАННЫХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СФЕРИЧЕСКОГО  
ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ЭТАПЕ РЕГИСТРАЦИИ  
ГОЛОГРАММЫ**

В работе получена зависимость несовпадения размера и пространственного положения самой частицы и её восстановленного изображения от радиуса кривизны волнового фронта. Установлено, что величина несовпадения зависит от расстояния регистрации и может быть учтена для уточнения размеров и положения частицы при известной кривизне волнового фронта.

D.V. KAMENEV, A.S. SINITSYN

*National Research Tomsk State University*

**THE RESEARCH OF PARTICLES SIZE  
AND POSITION VARIANCE CAUSED BY THE USE  
OF SPHERICAL WAVEFRONT AT THE STAGE  
OF DIGITAL HOLOGRAM REGISTRATION**

The dependence of mismatch of size and position of the particle and its reconstructed image from the radius of curvature of the wavefront is received. It was shown, that the value of this mismatch depend on the registration distance and may be used for particle size and position clarification for adjusted curvature of the wavefront.

Для исследования микрочастиц, расположенных в объёме среды, используются методы цифровой голографии, позволяющие зарегистрировать объём большой глубины, при этом сохранив приемлемое разрешение. Данные методы применяются для решения задач в биологии и экологии, медицине, оптике атмосферы и океана, используются для отладки технологических процессов, и т.д. [1-6]. По данным, восстановленным из цифровых голограмм, определяют как форму, размер, пространственное положение каждой отдельной частицы, так и усреднённые характеристики зарегистрированного на голограмме объёма, например, концентрация, распределение частиц по размерам и по положению в пространстве. Помимо этого, регистрация и обработка

видеопоследовательности голографических данных позволяет получить информацию о каждой частице в динамике.

Обычно для исследования частиц используется осевая схема регистрации, отличающаяся простотой реализации и низким требованиями, предъявляемым к разрешающей способности ПЗС-камеры и когерентности лазерного источника. При этом форму волнового фронта опорного пучка задают плоской, что гарантирует совпадение расстояний регистрации и восстановления голограмм, а также размеров самой частицы и её восстановленного изображения. В ряде практических случаев в качестве опорного источника используется сферическая волна, вследствие чего размеры частиц и их пространственное положение, определяемые по цифровым голограммам, не соответствуют размерам самих частиц и их положению на этапе регистрации голограммы.

Ранее в численном эксперименте показано [7], что в зависимости от формы волнового фронта происходит существенное рассогласование расстояний регистрации и восстановления голограмм частиц.

В настоящей работе выполнен численный и лабораторный эксперимент по регистрации и восстановлению цифровых голограмм модельных круглых частиц диаметром 500 мкм при различной кривизне волнового фронта на этапе регистрации голограммы. Установлено, что при форме волнового фронта, отличного от плоского, наблюдается несоответствие размеров и продольной координаты самой частицы и её восстановленного изображения, а его величина возрастает по мере увеличения расстояния. На основе полученных численных и экспериментальных результатов предложен способ учёта несоответствий при определении размеров и пространственного положения частиц.

#### *Список литературы*

1. Fugal J.P., Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Tech. 2009. V.2. P.259-271.
2. Katz J., Sheng J. Application of holography in fluid mechanics and particle dynamics // Annu. Rev. Fluid Mechanics. 2010. V.42. P.531-555.
3. Sun H., Benzie P.W., Burns N. Underwater digital holography for studies of marine plankton // Phil. Trans. R. Soc. A. 2008. V.366. P.1789-1806.
4. Бразовский В.В., Вагнер В.А., Евстигнеев В.В. Голографический метод исследования дисперсного состава аэрозоля // Горизонты образования. 2006. №8. С.1-9.
5. Choi Y., Lee S. Three-dimensional volumetric measurement of red blood cell motion using digital holographic microscopy // Optical Society of America. 2009. V.48. №16. P.2983-2990.
6. Sun H., Song B., Dong H. Visualization of fast-moving cells in vivo using digital holographic video microscopy // Journal of Biomedical Optics. 2008. V.13. №1. P.014007.
7. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Методы обработки и извлечения информации из цифровых голограмм частиц и их практическое применение // Известия вузов. Радиофизика. 2014. T.LVII. № 8-9. С.597-607.

М.С. МУРАВЬЕВА<sup>1</sup>, Ю.Н. ЗАХАРОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского*

<sup>2</sup>*Гарвардский университет, Кембридж, США*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЗАПИСИ И РЕКОНСТРУКЦИИ ГОЛОГРАММ В СИСТЕМЕ СКАНИРУЮЩЕЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ**

Рассмотрены особенности процесса восстановления цифровых голограмм, записанных при помощи модифицированного лазерного сканирующего микроскопа LSM-510.

M.S. MURAVYEVA<sup>1</sup>, Yu.N. ZAKHAROV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod*

<sup>2</sup>*Harvard University, Cambridge, USA*

## **ANALYSIS OF RECORDING AND RECONSTRUCTION PROCESS OF HOLOGRAM IN THE SYSTEM OF SCANNING HOLOGRAPHIC MICROSCOPY**

The features of the reconstruction process of digital holograms recorded using a modified laser scanning microscope LSM-510 are presented.

В настоящее время, исследования в сфере биологии тесно связаны с разработками в области физики. Новые методы исследований и существенные улучшения уже используемых методов могут приводить к новому уровню понимания функционирования и структуры исследуемых объектов. Современную биомедицинскую лабораторию сложно себе представить без наличия микроскопа. За последние десятилетия микроскопы претерпели существенные изменения дойдя до лазерных сканирующих микроскопов высокого разрешения. Наша лаборатория оснащена одним из таких микроскопов – лазерным сканирующим микроскопом ZEISSLSM-510 и нами были проведены усовершенствования системы путем добавления голографической части [1, 2].

Функция записи цифровых голограмм появилась благодаря внедрению в схему микроскопа канала для опорного луча. Однако, в ходе анализа голограмм, записанных нашей системой, были обнаружены нерегулярные фазовые искажения, которые претерпевали изменения в процессе сканирования. Так как исследования проводились на биологических

объектах – тонких срезах головного мозга мышей и крыс, то искажения могли быть следствием неоднородной структуры исследуемого образца. Для анализа искажений исследуемый объект был заменен на плоское зеркало и выпуклую линзу (так как это стабильные объекты с известными голографическими изображениями), но искажения остались. Было решено произвести математический расчет методом радиооптики прохождения опорного и предметного лучей в системе, и формирования голограммы.

В результате, из анализа полученного выражения голограммной структуры был сделан вывод, что для корректного восстановления голограмм необходимо проводить запись голограммы идеального зеркала. Из нее можно рассчитать фазовый набег, добавляемый сканирующей системой, при прохождении через нее предметной волны, и синус угла наклона сканирующего зеркала, меняющийся по мере сканирования. Интенсивность опорной и предметной волн может быть записана отдельно (интенсивность предметной волны рассчитывается из фотографии исследуемого объекта). Таким образом, процесс восстановления голограммы сводится к преобразованию Фурье, выделению информационного порядка и деконволюции с ядром, в котором присутствует зависимость от фазового набега (вносимого при прохождении сканирующей системы) и меняющегося угла наклона зеркала, а затем к выполнению обратного преобразования Фурье.

В ходе данной работы была проведена модернизация коммерческого микроскопа LSM-510 и разработан оригинальный алгоритм восстановления сканированных голограмм, что впоследствии позволяет построить фазовый портрет исследуемого объекта.

#### *Список литературы*

1. Захаров Ю.Н., Лобынцева В.В., Муравьева М.С. Восстановление волнового фронта микроскопических изображений в условиях записи голограмм с нерегулярными фазовыми искажениями сканирующего сигнального пучка // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиоп физика. 2011. №5(3). С.142–145.
2. Дуденкова В.В., Муравьева М.С., Захаров Ю.Н. Анализ искажений волнового фронта в схеме голографической сканирующей микроскопии // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиоп физика. 2014. №4(1). С.92–97.

А.Ю. БЕЛЯВЦЕВ, Р.Н. ЧИГРИН, А.В. ПАНЧЕНКО<sup>1</sup>,  
Н.В. АНДРЕЕВА, М.Л. ТЫНДЫК<sup>1</sup>, О.В. АНДРЕЕВА

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт онкологии им. Н.Н. Петрова,  
Санкт-Петербург*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРОЗРАЧНЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ**

В работе представлены результаты исследования динамики фазовых трансформаций прозрачных биоматериалов. Использование метода цифровой голографической интерферометрии позволило выявить, что во время хранения препаратов крови и её производных происходит фракционирование системы, которое приводит к увеличению плотности верхней части столба исследуемой жидкости.

A. Yu. BELYAVTSEV, R.N. CHIGRIN, A.V. PANCHENKO<sup>1</sup>,  
N.V. ANDREEVA, M.L. TYNDYK<sup>1</sup>, O.V. ANDREEVA

*ITMO University, Saint Petersburg*

*<sup>1</sup>N.N. Petrov Research Institute of Oncology, Saint Petersburg*

## **USING OF DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR ESTIMATION OF PHASE CHANGES OF TRANSPARENT BIOMATERIALS**

The results of research of dynamics of phase transformations of transparent biomaterials are presented. By using of digital holographic interferometry's method we could reveal that in storage time of blood preparations and its derivatives there is a fractionation of system that leads to increase of density of top part of a column of the studying liquid.

В настоящее время перспективным направлением является разработка методов скрининга и диагностики злокачественных опухолей. Биологические жидкости, к числу которых относятся цельная кровь и её производные, являются одним из главных объектов исследования в данном направлении. В работе представлен метод оценки изменений параметров биологических жидкостей в процессе их хранения с помощью цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ).

Методика с использованием ЦГИ разработана для получения данных о фазовых изменениях исследуемых прозрачных биоматериалов по высоте столба жидкости в заданный момент времени (см. рис. 1). Как видно из приведенных на рис. 1 данных показатель преломления исследуемой биологической жидкости уменьшается по глубине кюветы, а это является свидетельством того, что плотность жидкости уменьшается от верхнего уровня в направлении дна кюветы. В то же время сразу после изготовления препарата (исходное состояние препарата) все параметры жидкости имеют равномерное распределение по глубине кюветы. Расчеты изменения оптических параметров жидкости, выполненные при обработке экспериментальных данных, показывают, что через 40-60 минут хранения 1% препарат плазмы крови приобретает разницу показателя преломления по глубине около  $(1 \div 5)10^{-5}$ . Этот факт количественно свидетельствует о значительном фракционировании, происходящем в жидкости и о том, что существует значительная фракция частиц, которая всплывает, т.е. имеет плотность меньше, чем используемый для разбавления препарата физиологический раствор.

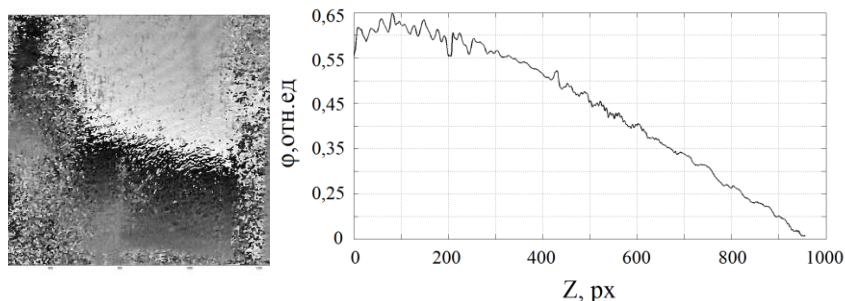


Рис. 1. Цифровая интерферограмма (слева) и результаты ее обработки (справа); объект - 1% препарат плазмы крови при хранении 40 минут

Проведенные предварительные эксперименты показали, что данный метод, реализованный с помощью прибора-стенда «Голографический визуализатор фазовых неоднородностей» имеет значительные перспективы, т.к. позволяет количественно оценивать временную динамику фракционирования биологических жидкостей, что в сочетании с другими методами исследования дает возможность оценивать и моделировать состав исследуемого препарата и физические параметры его биологических компонентов.

А.П. БОНДАРЕВА, Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ,  
Д.Ю. МОЛОДЦОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, И.Ю. ЭРКИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ СЕРИИ  
ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБОРА  
КОДИРУЮЩИХ КЛЮЧЕЙ В СХЕМЕ  
С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНЫМ  
ОСВЕЩЕНИЕМ НА БАЗЕ ДВУХ ЖК ПВМС**

Проведено оптическое кодирование и численное декодирование серии тестовых изображений с использованием набора различных кодирующих ключей в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух ЖК ПВМС. Проведен анализ полученных результатов.

A.P. BONDAREVA, N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV,  
D.Yu MOLODTSOV, P.A. CHEREMKHIN, I.Yu. ERKIN  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

**OPTICAL ENCRYPTION OF SERIES OF IMAGES  
USING A SET OF ENCRYPTION KEYS USING SCHEME  
OPERATING WITH SPATIALLY-INCOHERENT  
ILLUMINATION BASED ON TWO LC SLMS**

Optical encryption and numerical decryption of series of test images using a set of different encryption keys is carried out using scheme operating with spatially-incoherent illumination based on two LC SLMs and. The analysis of the obtained results is performed.

Схема оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным освещением на базе двух ЖК ПВМС подробно описано в [1]. В качестве кодируемых изображений использовались тестовые (256-градационные) изображения размером  $128 \times 128$  отсчетов, приведенные в таблице 1. В качестве кодирующих дифракционных оптических элементов (ДОО) использовались киноформы [2].

В качестве объектов кодирования использовалось 7 различных изображений размером  $128 \times 128$  отсчетов с 256 градациями яркости (см. таблицу 1). Каждое изображение кодировалось с использованием 7 различных случайных ключей кодирования. Ключи имели  $64 \times 64$



отсчетов, их нормированная средняя энергия составляла 0,005. На рис. 1 представлен пример оптического кодирования изображения.

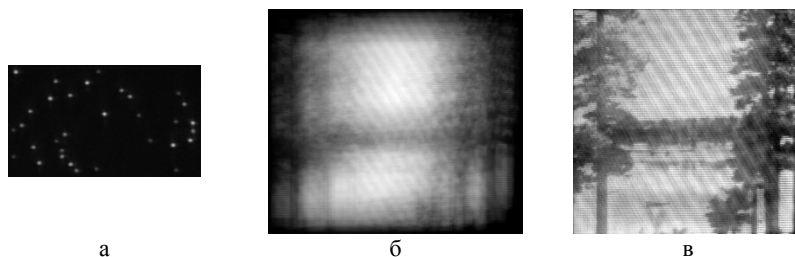









Рис. 1. Пример оптического кодирования изображения: ключ кодирования (а), кодированное с использованием этого ключа изображение (б), а также соответствующее ему численно декодированное изображение (в)

Декодирование осуществлялось численно с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [3]. Оценка качества декодированных изображений производилась путём расчёта нормированного среднеквадратичного отклонения (НСКО) декодированных изображений от исходных. Значения НСКО декодированных изображений приведены в таблице 1.

Таблица 1. Кодлируемые изображения и соответствующие им значения НСКО

						
0,154 ±0,007	0,212 ±0,005	0,234 ±0,012	0,271 ±0,008	0,155 ±0,015	0,231 ±0,012	0,145 ±0,007

Результаты проведённых экспериментов демонстрируют успешное кодирование и декодирование серии тестовых изображений с использованием набора различных кодирующих ключей. НСКО декодированных изображений лежит в диапазоне 0,15÷0,27.

#### Список литературы

1. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Scheme of optical image encryption with digital information input and dynamic encryption key based on two LC SLMs // *Physics Procedia*. 2015. V.73. P.320-327.
2. Bondareva A.P., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Optical encryption in spatially-incoherent light using two LC SLMs for both information input and encryption element imaging // *Proceedings of SPIE*. 2014. V.9249. P.924915.
3. Арсенин В.Я., Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.

С.С. НАЛЕГАЕВ, В.В. КРАСНОВ<sup>1</sup>, Н.В. ПЕТРОВ

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

*<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**СИСТЕМА АУТЕНТИФИКАЦИИ КОММЕРЧЕСКИХ  
ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
АСИММЕТРИЧНОГО ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО  
КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В работе исследуются особенности разработанной численной модели системы оптоинформационной аутентификации коммерческих технических устройств, в которой защита паролей таких устройств основана на использовании метода асимметричного голографического кодирования изображений.

S.S. NALEGAEV, V.V. KRASNOV<sup>1,2</sup>, N.V. PETROV

*ITMO University, Saint Petersburg*

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

**AN AUTHENTICATION SYSTEM  
OF COMMERCIALY-RATED TECHNICAL DEVICES  
WITH USE OF ASYMMETRIC HOLOGRAPHIC  
ENCRYPTION**

In this work we performed an investigation of the particularities of the developed numerical model of an optical information authentication system of commercially-rated technical devices. An asymmetric holographic encryption method is used to protect the passwords of such devices in this authentication system.

Идентификация и аутентификация являются необходимыми компонентами защиты информационных систем, поскольку все механизмы систем защиты информации связаны с использованием поименованных субъектов и объектов автоматизированных систем (АС) [1]. Для поименования объектов и субъектов им часто вводятся в соответствие некоторые идентификаторы, при этом цель процедуры аутентификации заключается в определении подлинности введенных данных [2] в отличие от процедуры идентификации, устанавливающей соответствие между представленными идентификаторами и связанными с ними субъектами. В общем случае субъектами могут являться технические устройства, процессы [1] или пользователи, а объектами АС выступает информация или другие ресурсы системы.

На данный момент опубликовано множество статей на тему асимметричного оптического кодирования изображений, например [3-8], которое обладает определенными преимуществами перед популярными в настоящее время методами и может быть использовано в качестве элемента системы аутентификации. В рамках настоящей работы была разработана численная модель системы оптоинформационной аутентификации коммерческих технических устройств, в которой пароли таких устройств защищены асимметричным голографическим кодированием изображений.

Потенциал применения таких систем аутентификации может быть реализован, например, в рамках концепции умного дома, для поддержания защищенного взаимодействия между различными коммерческими техническими устройствами: датчиками взлома или присутствия людей в помещениях; датчиками пожарной сигнализации, короткого замыкания или протечек воды; датчиками контроля влажности и температуры наружного или внутреннего воздуха; бытовыми устройствами, например, аудио- или видеосистемами (и другими), - и общей системой мониторинга и контроля умного дома. Для обеспечения процедуры аутентификации система мониторинга и контроля, а также все перечисленные устройства должны обладать уникальными комбинациями идентификаторов и паролей для защиты взаимодействия таких устройств между собой.

Налегаев С.С. и Петров Н.В. благодарят за поддержку министерство образования и науки РФ, проект № 2014/190 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания.

#### *Список литературы*

1. Гладких А.А., Дементьев В.Е. Базовые принципы информационной безопасности вычислительных сетей. Ульяновск: УлГТУ, 2009.
2. Смит Р.Э. Аутентификация: от паролей до открытых ключей. М.: Вильямс, 2002.
3. Chen W., Chen X. // J. Opt. 2011. V.13(7). P.075404.
4. Chen W., Chen X. // Opt. Commun. 2011. V.284(16-17). P.3913-3917.
5. Xi S., Wang X., Song L. Huang S., Chang S., Lin L. // J.Mod.Opt. 2014. V.62(2). P.102-107.
6. Mehra I., Nishchal N.K. // Opt. Commun. 2015. V.354. P.344-352.
7. Rajput S.K., Nishchal N.K. // J. Opt. Soc. Am. A. 2014. V.31(6). P.1233-1238.
8. Liua W., Xiea Z., Liub Z., Zhange Y., Liu S. // Opt. Commun. 2015. V.335. P.205-211.

С.А. БЕРДЫШЕВА, В.В. КРАСНОВ, С.С. НАЛЕГАЕВ<sup>1</sup>,  
Р.С. СТАРИКОВ

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ВИДЕ QR-КОДОВ В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ СВЕТЕ**

Представлены результаты экспериментов по оптическому кодированию и численному декодированию цифровой информации представленной в виде QR-кодов. Кодирование QR-кодов осуществлялось посредством схемы оптического кодирования изображений с пространственно-некогерентным монохроматическим освещением на базе двух ЖК ПВМС. Кодированные QR-коды успешно декодированы, частота появления ошибок составила  $(8,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$ .

S.A. BERDYSHEVA, V.V. KRASNOV, S.S. NALEGAEV<sup>1</sup>,  
R.S. STARIKOV

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>ITMO University, Saint Petersburg*

## **OPTICAL ENCRYPTION OF DIGITAL INFORMATION DEPICTED AS QR-CODES WITH SPATIALLY-INCOHERENT MONOCHROMATIC ILLIMINATION**

Results of experiments on QR-codes optical encryption and numerical decryption are presented. Optical encryption of digital information depicted as QR-codes was conducted on optical encryption setup operating with spatially incoherent monochromatic based on two LC SLMs. Encrypted QR-codes were successfully decoded with bit error rate  $(8,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$ .

В настоящее время все большую популярность приобретают QR-коды, представляющие собой матричные коды, содержащие алфавитные буквы, символы и цифры.

Установка кодирования построена на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС), служащих для ввода цифровой информации и для отображения кодирующего дифракционного оптического элемента (ДОО), в качестве которого использовались киноформы. После прохождения монохроматического

пространственно-некогерентного лазера через систему, состоящую из двух ЖК ПВМС и систему линз, на фотосенсоре камеры образуется изображение, представляющее собой свертку кодируемого QR-кода и импульсного отклика киноформа.

В качестве объектов кодирования использовалось 7 различных кодов QR-кодов размером  $129 \times 129$  отсчетов. Каждый QR-код кодировался с использованием 7 различных случайных ключей кодирования. Ключи имели  $64 \times 64$  отсчетов, их нормированная средняя энергия – 0,005.

Пример оптического кодирования и численного декодирования изображения QR-кода представлен на рис. 1.

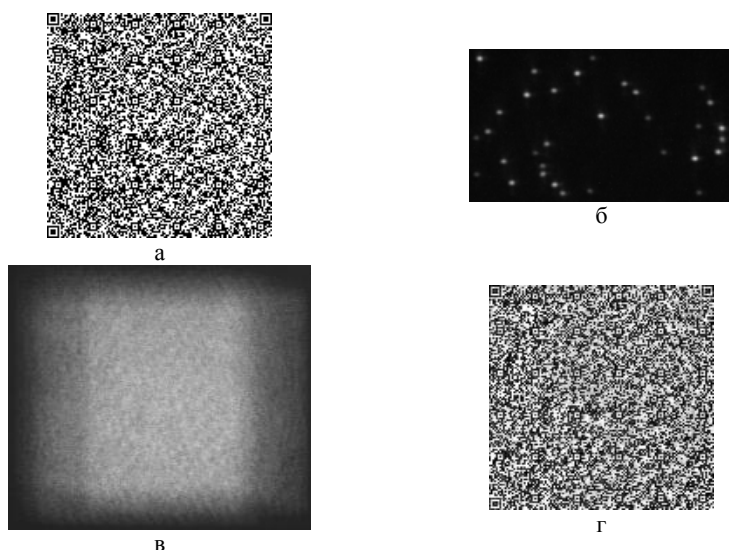


Рис. 1. Пример оптического кодирования изображения QR-кода: исходный QR-код (а), отображаемый на ПВМС1, кодируется функцией рассеяния точки (б) кодирующего ДОЭ, отображаемого ПВМС2, кодированное изображение (в) регистрируется камерой и затем численно декодируется (г)

Численное декодирование производилось с использованием метода инверсной фильтрации с регуляризацией по Тихонову [2]. После декодирования производилось сведение растров декодированного изображения с исходным корреляционным методом. Далее, производился подсчет ошибок. Полученное число ошибок для различных QR-кодов и ключей лежит в диапазоне  $13 \div 16$ , частота появления ошибок составляет  $(8,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-4}$ .

М.Н. КУЛАКОВ, Л.А. ПОРШНЕВА, Р.С. СТАРИКОВ,  
П.А. ЧЕРЁМХИН

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **РАСЧЕТ КИНОФОРМОВ ОБЪЁМНЫХ СЦЕН МЕТОДОМ «ПИНГ-ПОНГ»**

Киноформы – фазовые дифракционные оптические элементы, позволяющие восстанавливать информацию об объектной волне путем их освещения плоской или сферической волнами. Для синтеза киноформов объемных сцен можно использовать методы «пинг-понг». В работе рассматривается классический метод и его различные модификации для расчета киноформов.

M.N. KULAKOV, L.A. PORSHNEVA, R.S. STARIKOV,  
P.A. CHEREMKHIN

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

## **CALCULATION OF KINOFORMS OF 3D-SCENES BY THE “PING-PONG” METHOD**

Kinoforms are phase diffractive optical elements that allow recovering information about the object wave by plane or spherical waves illumination. For the synthesis of 3D-scenes kinoforms, the "ping-pong" methods can be used. The paper considers classical method and its various modifications for kinoforms calculation.

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) широко используются в задачах информационной и дифракционной оптики, например, в качестве:

- корректоров волновых фронтов,
- оптических коммутаторов,
- преобразователей в системах обработки изображений,
- фокусаторов и др.

К числу наиболее распространённых ДОЭ относятся киноформы. Киноформ [1-2] несёт информацию только о фазовой составляющей объектной волны и позволяет восстанавливать её при освещении плоской или сферической волной. К числу наиболее популярных методов оптического восстановления информации с киноформов относится их вывод на пространственно-временные модуляторы света [3].

Наиболее популярными методами синтеза киноформов являются алгоритмы Герчберга-Сэкстона [1] и Финапа [2], а также их модификации

[1]. Эти методы направлены в первую очередь на синтез фазовых ДОЭ для восстановления информации о «плоских» объектах [4].

Для синтеза ДОЭ объемных сцен, позволяющих восстанавливать «плоские» сфокусированные изображения в различных сечениях этих объемных сцен, можно использовать методы, подобные алгоритму «пинг-понг» [5-7]. Классическая схема метода приведена на рис. 1. Расчет распространения излучения и применение амплитудных и фазовых ограничений производятся между сечениями объемной сцены, соответствующим сфокусированным изображениям объектов (плоскости А и Б). А киноформ создается лишь расчетом распространения излучения до плоскости киноформа в качестве финального шага алгоритма.



Рис. 1. Схема синтеза киноформов объемных сцен методом «пинг-понг»

В настоящее время предложены различные модификации метода: например, итеративный алгоритм многих плоскостей [6], аддитивный итеративный алгоритм [7] и др. Подобные модификации позволяют синтезировать ДОЭ для восстановления сфокусированных изображений объектов, например, в 3 различных плоскостях. Для повышения качества восстановления добавлены расчеты распространения излучения в различных направлениях, а не только между объектными плоскостями.

#### Список литературы

1. Головашкин Д., Досколович Л., Казанский Н., Котляр В., Павельев В., Скиданов Р., Сойфер В., Хонина С. Дифракционная компьютерная оптика. М.: Физматлит, 2007.
2. Fienup J.R. Phase retrieval algorithms: a personal tour // Appl.Opt. 2013. V.52. P.45-56.
3. Toyoda H., et. al. Advances in application of liquid crystal on silicon spatial light modulator // SID Symposium Digest of Technical Papers. San Diego, 2014. V.45. P.559-562.
4. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Porshneva L.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Comparison of kinoform synthesis methods for image reconstruction in Fourier plane // Proceedings of SPIE. 2014. V.9131. P.913124.
5. Dorsch R.G., Lohmann A.W., Sinzinger S. Fresnel ping-pong algorithm for two-plane computer-generated hologram display // Applied Optics. 1994. V.33. Is.5. P.869-875.
6. Ying C.-F., Pang H., Fan C.-J., Zhou W., Ying C.-F. New method for the design of a phase-only computer hologram for multiplane reconstruction // Opt. Eng. 2011. V.5. P.055802.
7. Xiaoyu J.A., Chuang P., Xi W., Yantao Z. Novel iterative computation algorithm for kinoform of 3D object // Proceedings of SPIE. 2012. V.8556. P.85561H.

Н.В. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, П.А. ЧЕРЁМХИН, И.А. ШЕВКУНОВ<sup>1</sup>  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЦВЕТНЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ “НА ОТРАЖЕНИЕ”**

В работе представлены экспериментальные результаты по записи и восстановлению цифровых голограмм лазерными источниками, излучающими в различной части видимого спектра (417, 532 и 638 нм). Приведены результаты восстановления монохромных изображений объекта в случае использования разного количества информации из каналах байеровского фильтра.

N.V. PETROV<sup>1</sup>, P.A. CHEREMKHIN, I.A. SHEVKUNOV<sup>1</sup>  
*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)  
<sup>1</sup>ITMO University, Saint-Petersburg*

## **USE OF SPECTRAL INFORMATION UNDER RECONSTRUCTION OF COLOR DIGITAL HOLOGRAMS «IN REFLECTION»**

This paper describes experimental results on the simultaneous recording of digital holograms using different lasers: 417, 532 and 638 nm wavelengths. Results of monochrome image reconstruction of the object in the case of various information from Bayer filter channels are presented.

Цифровая голография – популярный метод для получения цветных и монохромных изображений объектов. Для получения цветных изображений обычно регистрируется серия голограмм, последовательно освещаемых излучением различных длин волн [1-3]. В случае одновременной записи голограммы различными источниками излучения, необходимо разделить восстановленные изображения, наложенные из-за наличия цветовых каналов камеры и различных длин волн излучения [4-6]. В работе предлагается получение монохроматических изображений объекта из одной цветной голограммы. Для этого, при записи голограмм используется цветная цифровая камера с массивом фильтров Байера (RGB), и когерентное излучение на трех RGB-длинах волн.

В эксперименте использовались три лазера длинами волн: 417, 532 и 638 нм. Голограммы регистрировались в RAW-формате; число пикселей



равнялось  $1536 \times 2048$ ; с размером  $1,4 \times 1,4$  мкм; расстояние до объекта было равно 58 см. На рис. 1а, б приведены изображения Фурье-спектра голограммы, зарегистрированной при использовании двух длин волн излучения (532 и 638 нм), и восстановленного изображения. На рис. 1б наблюдается наложение дифракционных порядков. Чтобы избежать этого, можно использовать информацию из отдельных спектральных каналов байеровского фильтра [4-5]. Так, на рис. 1в представлено изображение объекта, восстановленное при использовании только красного канала матрицы.

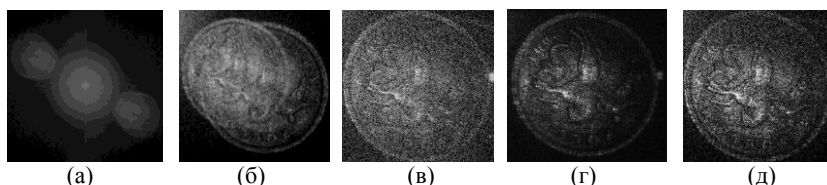


Рис. 1. Амплитуда фурье-спектра голограммы (а), записанной при использовании двух лазеров (532 и 638 нм), и восстановленные изображения объекта: с нее (б), из красного канала (в), при наложении восстановленных изображений из всех трех каналов (г), только красного и зеленого каналов (д) [6]

Для повышения качества изображения восстанавливаемого объекта было проведено сложение изображений из различных спектральных каналов байеровского фильтра [6]: как всех трех (рис. 1г), так и только красного и зеленого каналов (рис. 1д). Качество получаемого таким образом изображения зависит от засветки каждого из спектральных каналов излучением, регистрируемым в соседних каналах. При выборе оптимальных для спектрального отклика используемой камеры длин волн, которые минимизируют перекрестную засветку, качество может значительно возрасти [5].

Таким образом в работе были экспериментально апробированы методы восстановления монохромных изображений объекта из одиночной цветной цифровой голограммы.

#### *Список литературы*

1. Funamizu H., Shimoma S., Aizu Y. // Opt. Commun. 2014. V.312. P.245-251.
2. Ito Y., et al. // J.Disp.Technol. 2012.V.8. P.570-576.
3. Kiire T., et al. // Opt. Lett. 2012. V.37. P.3153-3155.
4. Лесничий В.В, Петров Н.В, Черёмхин П.А. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т.115. №4. С.633-643.
5. Cheremkhin P.A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V.536. P.012021.
6. Cheremkhin P.A., et al. // Physics Procedia. 2015. V.73. P.301-307.

**В.В. ДЁМИН, А.С. КОЗЛОВА**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

## **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАБОРА**

Рассмотрены особенности методов обработки цифровых голограмм на основе вейвлет преобразования Габора. Предложен алгоритм сжатия голографической видеопоследовательности.

**V.V. DYOMIN, A.S. KOZLOVA**

*National Research Tomsk State University*

## **HOLOGRAM VIDEO PROCESSING METHODS BASED ON GABOR WAVELET TRANSFORMATION**

The features of methods for digital hologram processing based on Gabor wavelet transform are considered. The hologram video compression algorithm is offered.

Задача кодирования-декодирования цифровых голограмм является актуальной, так как сжатие потока голографической информации позволяет существенно снизить требования, предъявляемые к объему цифровых носителей и к пропускной способности канала при передаче голограмм и их видеопоследовательностей по линиям связи.

В случае применения стандартных методов сжатия изображений к цифровым голограммам частиц и их видеопоследовательностям (например JPEG, MPEG-4) качество восстановленных с кодированных-декодированных голограмм изображений не может считаться приемлемым для дальнейшего извлечения информации о частицах [1], поэтому необходимо применение специализированных алгоритмов экономного кодирования, которые будут основываться на особенностях голограмм как отдельного класса изображений.

Система для обработки видеопоследовательностей цифровых голограмм состоит из модулей кодирования и декодирования голографической информации на основе вейвлета Габора. Вейвлет Габора представляет собой сложную синусоидальную функцию, которая хорошо коррелирует с синусоидальными характеристиками картины

интерференции опорной и предметной волн при записи голограммы, поэтому его можно применять для обработки цифровых голограмм.

В алгоритме кодирования не производится переход к YUV представлению голограммы, так как это значительно (в 1,4) раза снижает качество восстановленного изображения. Для уменьшения пространственной избыточности используется адаптивное скалярное квантование на основе весового критерия [2]. Для устранения временной избыточности используется построение поля векторов движения на основе оценки оптического потока. В качестве алгоритма вторичного сжатия используется арифметическое кодирование.

Особенностью алгоритма декодирования является отсутствие этапа перехода голограммы от частотных коэффициентов к цветовой модели и замена его на восстановление голограммы методом на основе Вейвлет преобразования Габора [3], а также определения плоскости наилучшей фокусировки для каждой частицы в кадре.

Для оценки качества изображений, восстановленных с декодированных голограмм, использовалась стандартная метрика отношение сигнала к шуму,

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MaxErr^2 M * N}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N (x_{ij} - y_{ij})^2}$$

где MaxErr – максимум модуля разности цветовой компоненты (для 8 битных изображений составляет 255),  $M$  и  $N$  – ширина и высота голограммы (в пикселях),  $x_{ij}$  и  $y_{ij}$  – значения интенсивности в изображениях, восстановленных с кодированной-декодированной и оригинальной голограмм.

Значения PSNR для изображений, восстановленных с декодированной и оригинальной численно моделированных видеопоследовательностей голограмм точечного источника, находятся в пределах [35,05; 36,3].

#### *Список литературы*

1. Демин В.В., Козлова А.С. Качество цифровых голограмм частиц после кодирования-декодирования // Известия вузов. Физика. 2012. Т.55. №9/2. С.155-157.
2. Лужков Ю.В. Адаптивное квантование и его использование в схемах сжатия изображений с потерями // Современные проблемы науки и образования. 2008. Вып.6. С.16.
3. Zhong J., Weng J. Reconstruction of digital hologram by use of the wavelet transform // Apl. Opt. 1999. V.38. №17. P.3730-3734.

Е.А. КУРБАТОВА, В.В. КРАСНОВ, Д.Ю. МОЛОДЦОВ,  
Л.А. ПОРШНЕВА, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАПИСИ И ОПТИЧЕСКОГО ВОССТАНАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ**

Для задачи оценки дифракционной эффективности и качества восстановления изображений с цифровых голограмм разработана методика моделирования записи голограмм и оптического восстановления изображений. Методика учитывает характеристики используемого объекта, регистрирующей камеры и используемого для вывода голограмм пространственно-временного модулятора света.

E.A. KURBATOVA, V.V. KRASNOV, D.Yu. MOLODTSOV,  
L.A. PORSHNEVA, P.A. CHEREMKHIN, V.G. RODIN  
*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **METHOD OF MODELING OF DIGITAL HOLOGRAMS REGISTERING AND IMAGES OPTICAL RECONSTRUCTION**

The technique of modeling of digital hologram recording and image optical reconstruction is proposed for estimation of diffraction efficiency and reconstruction quality. The method takes into account characteristics of the object, digital camera and spatial light modulator used for digital holograms displaying.

Качество восстановления изображений и дифракционная эффективность (ДЭ) – важнейшие характеристики в аналоговой голографии [1]. Вопросы оценки ДЭ и качества восстановления широко исследовались и описаны для различных регистрирующих сред. В цифровой голографии [2] в качестве подобной «среды» выступает фотосенсор камеры. При численном восстановлении имеет значение только качество изображений, а ДЭ имеет лишь умозрительный смысл. Однако в случае оптического восстановления ДЭ получает практическое наполнение. Наиболее распространённым методом оптического восстановления является вывод голограмм на пространственно-временные модуляторы света (ПВМС) [2-7]. Оптическое восстановление изображений с голограмм используется для удалённого отображения статических [2-4] и динамических [5-6] сцен, в том числе регистрируемых вне видимого диапазона [6], для проекционных систем [4] и др.

ДЭ и качество восстановления может быть определены путем моделирования регистрации голограммы и оптического восстановления изображений с них [7]. Используемая схема состоит из 4 этапов:

- создание модельного объекта,
- моделирование записи голограммы (распространение волны от объекта до плоскости голограммы, синтез голограммы),
- квантование голограммы, моделирование её вывода на ПВМС,
- моделирование оптического восстановления изображения (распространение волны от плоскости ПВМС до плоскости сфокусированного восстановленного изображения).

Методика учитывает следующие величины:

- характеристики используемого объекта;
- разрешение, шумовые и радиометрические параметры регистрирующей цифровой камеры;
- разрешение, количество градаций и тип ПВМС, используемого для вывода цифровых голограмм.

Использование разработанной методики численного моделирования даёт возможность выбирать условия записи цифровых голограмм, а также тип ПВМС, исходя из характера решаемой задачи, например, для регистрации и отображения объёмных сцен в режиме реального времени.

Работа была частично поддержана в рамках государственного задания 3.2066.2014/К.

#### *Список литературы*

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., Мир, 1973.
2. Schnars U., et al. Digital holography and wavefront sensing. Springer, Berlin, 2015.
3. Zeng Z., et al. Dynamic holographic three-dimensional projection based on liquid crystal spatial light modulator and cylindrical fog screen // Optical Review. 2015. V.22. P.853-861.
4. Gopinathan U., et al. A projection system for real world three-dimensional objects using spatial light modulators // Journal of Display Technology. 2008. V.4. Is.2. P.254-261.
5. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Porshneva L.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Improvement of quality of optical reconstruction of digital Fourier holograms displayed on phase-only SLM by its digital preprocessing // Proceedings of SPIE. 2014. V.9249. P.92491B.
6. Ferraro P., et al. Optical reconstruction of digital holograms recorded at 10,6  $\mu\text{m}$ : route for 3D imaging at long infrared wavelengths // Optics Letters. 2010. V.35. Is.12. P.2112-2114.
7. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Курбарова Е.А. Оценка дифракционной эффективности и качества изображений при оптическом восстановлении цифровых голограмм Френеля // Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т.57. №8-9. С.711-727.

**В.В. КОЛЮЧКИН, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ<sup>1</sup>, С.Б. ОДИНОКОВ,  
В.Е. ТАЛАЛАЕВ, И.К. ЦЫГАНОВ**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана  
<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

## **ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПОДЛИННОСТИ ГОЛОГРАММ НА ПАСПОРТНЫХ ДОКУМЕНТАХ**

В работе представлен принцип действия разработанного авторами прибора контроля подлинности защитных голограмм, основанный на косвенном методе измерения параметров элементарных дифракционных решеток.

**V.V. KOLYUCHKIN, E.Yu. ZLOKAZOV<sup>1</sup>, S.B. ODINOKOV,  
V.Ye. TALALAEV, I.K. TSYGANOV**

*Bauman Moscow state technical university  
<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

## **OPTOELECTRONIC DEVICE FOR VERIFY THE AUTHENCITY OF SECURITY HOLOGRAMS**

Optoelectronic device and method for authentication security hologram based on the indirect way of diffraction gratings parameters measurement is presented.

В настоящее время для защиты документов от подделки во всем мире успешно используются защитные голограммы. Их особое значение для защиты документов от подделки приводят к тому, что в этих условиях становится актуальной задача идентификации и контроля подлинности ЗГ с помощью автоматических оптико-электронных приборов и устройств в реальном масштабе времени.

Предлагаемый оптико-электронный прибор контроля подлинности голограмм (ОЭП-КПГ) позволяет определять один из основных характерных признаков защитных голограмм, позволяющий в последующем с высокой вероятностью идентифицировать защитную голограмму в минимально короткие временные сроки в автоматическом режиме. Таким признаком является пространственно-частотный спектр (ПЧС) защитной голограммы, полученный при облучении ее когерентным излучением. В зависимости от характеристик решеток можно регистрировать ПЧС определенных зон на ЗГ и сравнивать его с ПЧС эталонной ЗГ для проведения операции идентификации голограммы.

Идентификация ЗГ основывается на том факте, что ПЧС каждой зоны уникален. Измерив расстояние между пиками ПЧС и их взаимное расположение, можно рассчитать период микрорельефа дифракционных решеток ЗГ. Также, зарегистрировав значения интенсивностей дифракционных порядков в спектре, можно вычислить глубину микрорельефа дифракционных решеток ЗГ.

Прибор представляет собой прямоугольный корпус с ложементом, закрываемым крышкой. В корпусе на двух цилиндрических направляющих размещена перемещающаяся оптическая головка, обеспечивая линейное сканирование. Оптическая головка содержит канал наведения, предназначенный для позиционирования прибора относительно исследуемого документа, и систему идентификации, состоящую из четырех каналов регистрации. В качестве источников излучения в каждом канале регистрации используется лазерные диоды с длинами волн 0.405, 0.532, 0.65, 0.85 мкм.

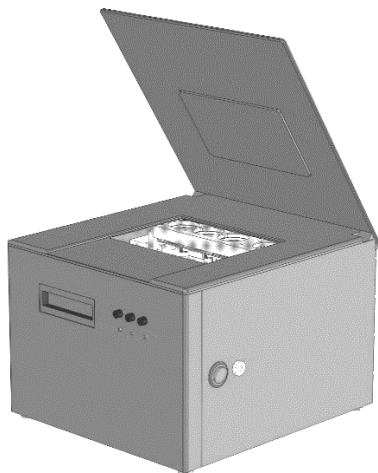


Рис. 1. Вид оптико-электронного прибора контроля подлинности голограмм

#### *Список литературы*

1. Хорохоров А.М., Клишук А.М., Цыганов И.К., Одинокоев С.Б., Ширанков А.Ф. Исследование влияния параметров фазовых дифракционных решеток на распределение интенсивности дифрагированного света при формировании цветокодированных изображений // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". 2005. №4.
2. Колючкин В.В., Злоказов Е.Ю., Одинокоев С.Б., Талалаев В.Е., Цыганов И.К. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов // Компьютерная оптика. 2015. Т.39. №2.

Д.Ю. МОЛОДЦОВ, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН, В.Г. РОДИН  
*Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ"*

## **ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ DMD-МОДУЛЯТОРОВ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУРЬЕ-ГОЛОГРАММ**

Экспериментально оценивалось качество восстанавливаемых импульсных откликов голограмм, выводимых на три DMD-модулятора различных моделей. По разработанной методике оценивалась интегральная характеристика оптического качества данных модуляторов – размер условно плоского участка поверхности матрицы. Проанализированы результаты восстановления голограмм.

D.Yu. MOLODTSOV, V.V. KRASNOV, P.A. CHEREMKHIN,  
V.G. RODIN

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

## **IMPACT OF DMD-SLMS ERRORS ON RECONSTRUCTED FOURIER HOLOGRAMS QUALITY**

Experimentally evaluated the quality of reconstructed impulse responses of holograms displayed on a three DMD modulators of different models. The integral parameter of modulators' optical quality – the size of conventionally flat surface of matrix – was evaluated according to the developed technique. The results of holograms reconstruction is analyzed.

Технология DMD (Digital Micromirror Device) в настоящее время широко применяется в различных областях науки и техники: DLP-проекторы, голографические принтеры, 3D-дисплеи и др.

В проведённых исследованиях рассмотрена возможность использования DMD в дисперсионных корреляторах – устройствах для оптического распознавания по пространственным и спектральным характеристикам объекта, использующего в качестве фильтров голограммы Фурье. Чтобы DMD модулятор мог быть использован в качестве устройства вывода голограмм, он должен удовлетворять ряду дополнительных требований, так как возможен негативный эффект – наличие нежелательной фазовой модуляции, возникающей из-за технологических погрешностей в конструкции модулятора.

В документации к DMD-модулятору можно найти следующие характеристики, относящиеся к технологическим погрешностям, влияющих на оптическое качество: погрешность угла наклона



микрозеркал, погрешность ориентации оси наклона микрозеркал, плоскостность выходного окна модулятора. Для используемых в данной работе DMD значения этих параметров составляли соответственно  $\pm 1^\circ$ ,  $\pm 1^\circ$  и 4 интерференционные полосы.

Для многих областей применения такого типа модулятора важна лишь амплитудная модуляция излучения, и указанные погрешности не оказывают существенного влияния. Однако при использовании DMD в качестве устройства вывода голограмм, как показано в [1], происходит ощутимое ухудшение восстанавливаемого импульсного отклика. В этой работе в оптической схеме для удобства подведения освещения к модулятору использовался заводской блок, включающий расщепитель пучка и конденсорную линзу. В [2] данный блок был исключен из схемы, что не привело к улучшению качества восстанавливаемого изображения. Таким образом, было экспериментально показано, что имеющиеся технологические погрешности DMD заметно ограничивают возможности его применения для вывода голограмм.

В данной работе экспериментально оценивалось качество восстанавливаемых импульсных откликов голограмм, выводимых на три различных DMD-модулятора от Texas Instruments. Все модуляторы относятся к семейству 0.7 XGA  $12^\circ$  DDR, модели s1076-7071b и два s1076-7072 (используются в DLP Discovery 4100 Development Kit). Для оценки применялась методика, предложенная в [2]. В качестве характеристики оптического качества DMD-модулятора было предложено использовать размер условно плоского участка поверхности матрицы. Для её оценки достаточно определить максимальный размер (в отсчётах) голограммы, импульсный отклик которой содержит решётку с периодом в 2 пикселя и которая будет разрешима в восстановленном изображении.

Результаты заметно отличаются даже для DMD-чипов одной модели: качество одного из модуляторов s1076-7072 оказалось существенно лучше (размер условно плоского участка в среднем равен 3 мм, у двух других – 1.5 мм). Таким образом было установлено, что по документации к модуляторам невозможно выяснить, удовлетворяет ли их оптическое качество для использования в качестве устройства вывода голограмм, и необходимо анализировать качество индивидуального экземпляра.

#### *Список литературы*

1. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov S.N. The Possibility of using DMD SLM for hologram filters displaying in dispersive correlator // Physics Procedia. 2015. V.73. P.338–342.
2. Молодцов Д.Ю. Экспериментальная оценка оптического качества DMD модулятора для использования в качестве устройства вывода фурье-голограмм // Сборник трудов IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015», С-Пб, 2015.

## ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

### -А-

Авербух Б.Б. 373  
Авербух И.Б. 373  
Аверкин С.Н. 97  
Агеев Э.И. 231  
Адамов Г.Е. 111, 253  
Акимов А.А. 145  
Акмалов А.Э. 157  
Акылбаев Т.М. 35  
Алагашев Г.К. 105  
Алексеев А.М. 297, 299  
Алексеев К.Н. 57  
Алиев С.А. 45  
Альмохамед Я. 25  
Андреев А.Л. 43  
Андреева М.С. 237  
Андреева Н.В. 167, 424, 446  
Андреева О.В. 167, 223, 424, 446  
Андреева Я.М. 231, 239  
Антипов А.А. 22  
Анцыгин В.Д. 31  
Аракелян С.М. 22  
Аранчий С.М. 227  
Артюков И.А. 185  
Асадова А.А. 303  
Асеев В.А. 273  
Асташкевич С.А. 376  
Ахматханов А.Р. 35  
Ашиккалиева К.Х. 83  
Ашкинази Е.Е. 227, 237

### -Б-

Бабенко А.А. 327  
Бабенко И.Д. 378  
Бабкин О.Э. 333  
Баззал Х. 247  
Балбекин Н.С. 426  
Барачевский В.А. 111  
Барбанакова Ю.А. 378  
Бариль Р. 25  
Баршак Е.В. 57  
Барышников Н.В. 416  
Белавенцева А.В. 420  
Белашов А.В. 440  
Беляевцев А.Ю. 446

Бердышева С.А. 452  
Березина Е.А. 380  
Беспалов В.Г. 93, 177  
Бетин А.Ю. 225  
Бибиб А.Ю. 273  
Бирюков А.С. 105  
Благов А.Е. 91  
Блох А.И. 249  
Бобрешов А.М. 199  
Бойкова А.С. 85  
Бойченко А.П. 355  
Болдырев К.Н. 27, 73, 257  
Болтарь К.О. 119, 265  
Большаков А.П. 21  
Бондарева А.П. 448  
Боровикова Е.Ю. 73  
Бородако К.А. 113  
Бородин А.Н. 428  
Бородин М.В. 35  
Бородкин А.В. 95  
Брук М.А. 97  
Брюханов В.В. 79  
Бубис Е.Л. 396  
Бужан П.Ж. 404  
Бункин А.Ф. 29  
Буримов Н.И. 141  
Бурлаков И.Д. 119  
Бусаров А.С. 175  
Бусурин В.И. 171, 408, 410  
Буть А.И. 179  
Буфетов И.А. 105  
Бухарин М.А. 107  
Быков А.А. 65  
Быковский А.Ю. 191  
Быстров Ф.Г. 89  
Бышевский-Конопко О.А. 61

### -В-

Вартамян Т.А. 22  
Вартапетов С.К. 107, 243, 321  
Васильев Д.Д. 71  
Васильев Е.В. 143  
Васильев Н.А. 137  
Васильев С.В. 353  
Васильева В.В. 283

Вахтомин Ю.Б. 71, 115  
Ведяшкина А.В. 159, 169  
Вейко В.П. 231  
Векшин М.М. 331  
Великасов С.С. 203  
Вельмискин В.В. 103  
Вереникина Н.М. 165  
Вин И.Н. 408  
Виноградов А.В. 175  
Виноградов Ю.В. 436  
Власов М.Ю. 31  
Власов П.В. 119  
Власова Е.А. 239  
Вовк Т.А. 187  
Вовченко Е.Д. 245  
Водчиц А.И. 25  
Войнов Ю.П. 25  
Волков В.В. 91  
Волков М.В. 181, 436  
Волова Л.Т. 313, 315  
Волошинов В.Б. 33  
Волынский М.А. 163, 181, 418  
Волынец А.Б. 109  
Воробьева Е.В. 145  
Воропай Е.С. 247  
Вышневи́й А.А. 75

**-Г-**

Габитов И.Р. 121  
Гавва В.А. 27  
Гадомский О.Н. 371  
Гайнутдинов Р.Х. 386  
Гайтко О.М. 305  
Галуцкий В.В. 39, 378  
Ганин Д.В. 107, 243, 321  
Гарифуллин А.И. 386  
Гарнаева Г.И. 394  
Герасимов В.А. 400, 422  
Голант К.М. 101  
Голубев К.А. 414  
Гончарук И.Н. 301  
Горева О.В. 361, 384  
Горелик В.С. 25  
Городецкий А.А. 426  
Горяев М.А. 295  
Град Я.А. 225  
Грачев Я.В. 177  
Гребенников Е.П. 111, 253  
Григорьев А.А. 113  
Гусев С.А. 396

**-Д-**

Давыдова М.Г. 197  
Дейнеко Д.В. 73  
Денисов Д.Г. 416  
Дёмин В.В. 211, 219, 289, 458  
Дзедолик И.В. 129  
Дианов Е.М. 105  
Дивочий А.В. 71, 115  
Дмитриев Е.А. 380  
Добрецова Е.А. 73  
Довженко Д.С. 99, 277, 281  
Долгирев В.О. 388  
Долонов И.А. 69  
Доронин И.С. 249  
Дуденкова В.В. 189  
Дудкина Т.Д. 305  
Дудова Д.С. 319  
Дьякова Ю.А. 85, 91  
Дю В.Г. 41

**-Е-**

Евстихиев Н.Н. 213, 215, 430, 448  
Егоров А.Н. 404  
Егорова О.Н. 103  
Егорышева А.В. 305  
Екимов Е.А. 27  
Емельянов В.И. 22  
Еремчук А.И. 119  
Ерин Д.Ю. 103  
Ермолаев П.А. 181

**-Ж-**

Жаркий Н.В. 353  
Жихарев Е.Н. 97  
Журкова И.С. 126

**-З-**

Заведеев Е.В. 83  
Зажогин А.П. 247, 291  
Заляпин Н.В. 43  
Заседателев А.В. 77  
Захаров Ю.Н. 189, 444  
Зачиняев Ю.В. 345  
Звайгзне М.А. 81  
Звегинцев В.Н. 51  
Зверев Г.М. 153  
Землянов М.М. 153  
Зимин С.П. 22  
Зинин П.В. 65  
Зиновьев Е.В. 111

Злобин А.О. 141  
Злоказов Е.Ю. 349, 462  
Золотов Ф.И. 115  
Золотовский И.О. 357  
Золотухин Е.В. 199  
Зотов С.Д. 67, 261  
Зюбин А.Ю. 79

**-И-**

Иванов А.А. 113  
Иванов А.Ю. 353  
Иванов В.И. 363  
Иванов М.С. 361  
Иванов П.А. 193  
Иванов С.И. 51  
Иванова Г.Д. 363  
Иванова С.В. 365  
Ивахник В.В. 145, 147  
Илларионов А.И. 287, 361, 392  
Илларионова Е.А. 287  
Ильин А.Л. 404  
Ильина В.В. 333  
Ильина К.Б. 85, 91  
Ильинский А.В. 259, 301, 311  
Ильясова А.А. 341  
Иртуганов Н.Н. 185

**-К-**

Казанцева Е.В. 135  
Калашников Е.В. 406, 414,  
Кальнов В.А. 97  
Каменев В.Г. 227  
Каменев Д.В. 211, 289, 442  
Камшилин А.А. 163, 418, 420  
Каплунов И.А. 33  
Капралова В.М. 311  
Капранов В.В. 53  
Капырин Н.И. 201  
Карасик В.Е. 416  
Карачевцева М.В. 263  
Каргин Ю.Ф. 141  
Карлагина Ю.Ю. 231, 239  
Карпец Ю.М. 359  
Карцев П.Ф. 375  
Кастро Р.А. 259  
Катковник В.Я. 183  
Кистенева М.Г. 41  
Ковалев М.С. 165, 209  
Ковалёва С.М. 137  
Коваленко Л.Л. 390

Ковальчук М.В. 85, 91  
Козлова А.С. 219, 458  
Козловский К.И. 233  
Колдасова С.К. 201  
Колесников С.А. 161  
Колесникова Е.С. 161  
Колобкова Е.В. 273, 279  
Колосова Е.С. 165  
Колючкин В.В. 462  
Колядин А.Н. 105  
Компанец И.Н. 43  
Комяк А.И. 291  
Конов В.И. 21, 83, 227  
Конonenко Т.В. 21, 83  
Константинова Е.И. 79  
Конте Дж. 21  
Копытов С.М. 239  
Коркишко Ю.Н. 329  
Коробков В.В. 171, 173  
Коробков К.А. 410  
Короленко П.В. 197  
Короннов А.А. 153  
Коротков К.С. 327  
Косова И.С. 137  
Косолапов А.Ф. 105  
Костина Г.В. 369  
Кострин Д.К. 229, 235, 400, 422  
Кострицкий С.М. 283, 329  
Котковский Г.Е. 157, 233, 277  
Котликов Е.Н. 271  
Кошелеев А.Г. 199  
Кошелеев К.И. 69  
Крадько В.А. 380  
Красин Г.К. 209  
Краснов В.В. 215, 448, 450, 452, 460,  
464  
Кривенков В.А. 81, 233  
Криштоп В.В. 369  
Кугаенко О.М. 237  
Кудрявцев Е.М. 53  
Кудрявцев Е.М. 67, 261  
Кудрявцева А.Д. 25  
Кузицин Ю.А. 233  
Кузнецов И.О. 375  
Кузнецова Ю.О. 87, 307  
Кузьменко А.Д. 331  
Кузьмин Н.Н. 257  
Кузьмина А.В. 177  
Кузьмина Т.Б. 167

Кузяков Б.А. 49, 55, 335  
Кулабухова А.Ю. 313  
Кулаков М.Н. 454  
Кульчин Ю.Н. 420  
Куля М.С. 426  
Куляхтина Н.М. 267  
Купперс Ф. 121  
Курбангалеев В.Р. 111, 253  
Курбатова Е.А. 213, 460  
Кутанов А.А. 203  
Кутровская С.В. 22  
Кучерик А.О. 22

**-Л-**

Лавров А.П. 51  
Лагошный И.С. 434  
Лалпин В.А. 357  
Лалшин К.Э. 243, 321  
Лвин Н.Т. 173  
Лебедев А.А. 261  
Левченко А.С. 327  
Левченко К.С. 111, 253  
Ливашвили А.И. 369  
Липатова Ж.О. 279  
Лисенков А.А. 229, 235  
Литвинова В.А. 359  
Литвинова М.Н. 359  
Логачева Е.И. 325  
Ложкарев В.В. 396  
Лопухин А.А. 119  
Лоскутов А.И. 29  
Лощенов В.Б. 89, 307, 309  
Луговской А.В. 61  
Луканин В.И. 47  
Лявшук И.А. 179  
Ляликов А.М. 179  
Ляпин С.Г. 27  
Ляшко Е.И. 139

**-М-**

Маерицкий О.Б. 404  
Маймистов А.И. 135, 139  
Майор А.Ю. 255  
Макаревич А.В. 141  
Макаров В.А. 133  
Макаров В.И. 87, 89  
Макаров В.П. 203  
Макин В.С. 151, 241, 269, 323, 325  
Макин Р.С. 151, 241, 269, 323  
Маклыгина Ю.С. 95, 309

Малеванная Е.И. 71  
Малинина П.И. 209  
Малов А.Н. 432, 434  
Мальшеев В.А. 137  
Мальшеев П.Б. 111  
Мальшакова О.А. 396  
Мамин А.В. 153  
Мамонтов О.В. 163  
Мамрашеев А.А. 31  
Мандель А.Е. 35  
Мануковская Д.В. 37  
Манухин Б.Г. 223  
Маргарянц Н.Б. 181  
Мартынов В.О. 396  
Мартынов И.Л. 81, 99, 277, 281  
Марцынюков С.А. 229, 235  
Марченкова М.А. 85, 91  
Масальский Н.В. 155  
Мацак И.С. 53  
Мачихин А.С. 65  
Мелехов А.П. 245  
Мелидина А.А. 333  
Меховский Е.А. 398  
Минаев Н.В. 319  
Минин И.В. 131, 351  
Минин О.В. 131, 351  
Митрофанов С.С. 402  
Митягин Ю.А. 233  
Могильный В.В. 293  
Моисеев К.М. 71  
Молодцов Д.Ю. 448, 460, 464  
Молчанов В.Я. 63  
Молчанова А.Д. 257  
Морозов П.В. 71  
Мосейко Д.В. 223  
Муравьева М.С. 444  
Мясоедова И.А. 317

**-Н-**

Набатов Б.В. 85  
Набиев И.Р. 81  
Набиуллина Л.А. 259  
Налбантов Н.Н. 39  
Налегаев С.С. 450, 452  
Настулявичус А.А. 404  
Небавский В.А. 349  
Неупокоева А.В. 432, 434  
Нефедьев Л.А. 394  
Никитин В.А. 331  
Никитин П.А. 33

Никифоров Н.Д. 327  
Николаев В.В. 225  
Николаев Н.А. 31  
Николаева Т.Ю. 187, 432  
Никонов А.В. 265, 267  
Никонович О.Л. 287  
Никоноров Н.В. 273, 279  
Нищев К.Н. 103  
Новоселов Е.В. 426  
Ногтев Д.С. 22  
Нурбек С.У. 203

**-О-**

Обидин А.Э. 243, 321  
Образцова Е.А. 83  
Образцова Е.Д. 251  
Овеченко Д.С. 355  
Одинокоев С.Б. 209, 225, 462  
Одинцова Г.В. 231, 239  
Орлович В.А. 25  
Осипов А.В. 22  
Осипов Е.В. 99, 277, 281  
Ошурко В.Б. 29

**-П-**

Павлов А.В. 207  
Павлов И.Н. 159, 169  
Павлов П.В. 432, 434  
Палатников М.Н. 37, 283, 382  
Пантелей Е. 285  
Панченко А.В. 446  
Паранин В.Д. 285  
Пашкевич М.Э. 259  
Перин А.С. 380  
Перлов Д.Д. 126  
Першин С.М. 29  
Першуткина С.В. 315  
Петникова В.М. 133  
Петров Н.В. 183, 187, 217, 426, 432,  
440, 450, 456  
Петрова Е.К. 195, 430  
Пикуль О.Ю. 382, 390  
Пирязев И.Н. 233  
Писаревский Ю.В. 91, 161  
Плёткин А.П. 337  
Пливак С.А. 339, 345  
Пнев А.Б. 69  
Поваров К.С. 402  
Погребная А.О. 347  
Половцев И.Г. 289

Поляков А.В. 412  
Пономаренко В.П. 265, 267  
Пономарев Р.С. 109  
Попов Н.Л. 175  
Попова Е.В. 404  
Попова И.О. 301  
Попович А.Ф. 227  
Порошин Н.О. 111, 253  
Поршнева Л.А. 454, 460  
Постнова И.В. 255  
Потатуркин О.И. 31  
Проклов В.В. 61  
Просеков П.А. 85  
Проценко Д.Ю. 255  
Прямыков А.Д. 105  
Путилин С.Э. 217  
Пьянков С.С. 430

**-Р-**

Ральченко В.Г. 21, 227  
Рахимов Р.А. 99  
Ринкевичус Б.С. 159, 169  
Рогалин В.Е. 227, 237  
Рогов П.Ю. 93  
Рогожин А.Е. 97  
Родин В.Г. 460, 464  
Розенбаум А.Ю. 313  
Романов В.В. 231  
Ромашко Р.В. 420  
Рощупкин В.В. 67, 261  
Руднев П.О. 305  
Рудоман А.Н. 327  
Рузин М.В. 227  
Рыбась А.Ф. 341, 343, 347  
Рыжикова Ю.В. 197  
Рыжов И.В. 137  
Рябухо В.П. 221, 438  
Рябченко В.Ю. 380

**-С-**

Савельев Е.А. 101  
Савельев М.В. 147  
Савон А.Е. 73  
Савонин С.А. 221  
Садовский А.П. 126  
Саенко И.И. 51  
Салецкий А.М. 275  
Салмин В.В. 317  
Салмина А.Б. 317  
Самойлов В.О. 311

Самохвалов П.С. 81  
Сапарина С.В. 297  
Сафутин А.Е. 153  
Сахаров А.А. 416  
Сахбиева А.Р. 394  
Свяховский С.Е. 275  
Севостьянов О.Г. 283, 329  
Северюков С.Ю. 355  
Селезнев В.А. 71, 115  
Селезнева Е.А. 303  
Селиванов Л.М. 400, 422  
Семенов К.П. 181  
Семенова И.В. 440  
Семенова Л.Е. 367  
Семенов Д.И. 357  
Семёнов С.Л. 103  
Семкин А.О. 388  
Семусева С.М. 408  
Серезин А.Ю. 85  
Сидоров И.С. 163, 418  
Сидоров Н.В. 37, 382  
Силин Д.Е. 396  
Синицын А.А. 442  
Ситников Н.Н. 113  
Скрябин Н.Н. 107  
Слежкин В.А. 79  
Смирнов А.И. 396  
Смирнов К.В. 71, 115  
Смирнов С.В. 35  
Снимщиков И.А. 203  
Соломашенко А.Б. 225  
Сон Д.И. 388  
Сон С.И. 388  
Сосунов А.В. 109  
Спирин А.В. 97  
Станкевич А.И. 293  
Стариков Р.С. 43, 195, 349, 430, 452,  
454  
Степанов А.Н. 396  
Стерликова Н.С. 59  
Стифуткин А.А. 404  
Страхов В.А. 263  
Стрельцов Д.Р. 97  
Строганова Е.В. 39, 378  
Строкова Ю.А. 275  
Супрунова О.А. 77  
Сухарев В.А. 126  
Сюй А.В. 249

**-Т-**

Талайкова Н.А. 438  
Талалаев В.Е. 462  
Теплякова Н.А. 37  
Терещенко Е.Ю. 85, 91  
Тимченко Е.В. 303, 313, 315  
Тимченко П.Е. 303, 313, 315  
Толкачев А.В. 169  
Толстик А.Л. 123  
Тихонов Р.В. 49, 55  
Трегуб Н.В. 303  
Третьяченко А.В. 81  
Трофимов Н.С. 45  
Трофимова А.В. 293  
Туан Ф.А. 171  
Турутин Ю.А. 161  
Тындык М.Л. 446

**-У-**

Уланова А.В. 398  
Умрейко Д.С. 291  
Успенский С.А. 227  
Ухов А.А. 400, 422  
Ушков А.А. 149

**-Ф-**

Фадаиян А.Р. 247  
Фаррахова Д.С. 307  
Федоров А.Н. 29  
Федоров В.А. 329  
Федоров С.А. 197  
Федотов П.В. 251  
Федянин Д.Ю. 59, 75, 117  
Филатов А.Л. 61  
Фролов Д.Р. 327

**-Х-**

Халилов С.И. 341, 343  
Хамадеев М.А. 386  
Харинцев С.С. 297, 299  
Хе В.К. 363  
Хомич А.А. 83  
Храмцов И.А. 117  
Худяков Д.В. 107

**-Ц-**

Цыганов И.К. 462

**-Ч-**

Чарухчев А.В. 414  
Черёмхин П.А. 213, 448, 454, 456,  
460, 464

Чернега Н.В. 25  
Черниговский В.В. 229, 235  
Чернов А.И. 251  
Черных Е.А. 299  
Черняк М.Е. 398  
Чехлова Т.К. 45  
Чигрин Р.Н. 424, 446  
Чижиков С.И. 63  
Чипегин А.А. 217  
Чиркова И.М. 283, 329  
Чистяков А.А. 77, 81, 99, 157, 233,  
277, 281  
Чудов К.А. 111

**-Ш-**

Шадрин Е.Б. 259, 301, 311  
Шалковская П.Ю. 315  
Шандаров В.М. 380  
Шандаров С.М. 35, 41, 141  
Шарангович С.Н. 388  
Шарова А.С. 309  
Шаульский Д.В. 195, 430  
Шевкунов И.А. 183, 456  
Шейфер Д.В. 113  
Шелестов Д.А. 69  
Шеляков А.В. 113  
Шепелевич В.В. 141  
Шифрина А.В. 215  
Шишкина К.В. 47  
Шкараев М.С. 121

Шленов С.А. 143  
Шмелин П.С. 111  
Шмидт А.А. 141  
Штагер М.Д. 137  
Штарев Д.С. 249  
Штарева А.В. 249  
Шувалов В.В. 133  
Шумилин А.С. 339, 345  
Шур В.Я. 35

**-Щ-**

Щербаков А.А. 149  
Щербаков С.В. 137  
Щипунов Ю.А. 255  
Щукарев И.А. 371

**-Э-**

Эркин И.Ю. 448

**-Ю-**

Юрковец Е.В. 271  
Юшков К.Б. 63

**-Я-**

Яворский М.А. 57  
Яковенко Н.А. 331, 378  
Яковлева Н.И. 265, 267  
Яничкин В.В. 179  
Яновский А.В. 205  
Яременко Н.Г. 263  
Яцук Р.М. 239