

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)

ББК 72г

Н 34

**XII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов.** М.: НИЯУ МИФИ,
2023. – 664 с.

Сборник научных трудов содержит материалы докладов, включённых в программу XII Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 1–3 февраля 2023 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, прикладные вопросы оптики.

Ответственный редактор Родин В.Г.

Статьи получены до 10 декабря 2022 г.

ISBN 978-5-7262-2931-7

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2023

Подписано в печать 08.02.2023. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 41,5. Изд. № 002-2. Тираж 60 экз. Заказ №5.

*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

Евтихийев Н.Н. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Альтшулер Г.Б. – IPG-Medical Corp., Marlborough, USA

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. – University of Arizona, Tucson, USA

Десятников А.С. – Australian National University, Canberra, Australia

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. – Пермская научно-производственная приборостроительная компания

Кульчин Ю.Н. – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток

Кутанов А.А. – Институт физико-технических проблем и материаловедения НАН
Кыргызской Республики, Бишкек

Лавров А.П. – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Маймистов А.И. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Маломед Б. – Tel Aviv University, Israel

Потатуркин О.И. – Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск

Ромашко Р.В. – Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток

Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный
университет

Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Твердохлеб П.Е. – Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск

Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Фетисов Ю.К. – МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

Шандаров С.М. – Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель:

Кузнецов А.П. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ученый секретарь:

Родин В.Г. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

СОДЕРЖАНИЕ

ДРАЧЕВ В.П. Гибридные плазмон-кремниевые устройства в интегральной фотонике.....	28
ЧЕРНИКОВ А.С., ЦЕЛИКОВ Г.И., ГУБИН М.Ю., ШЕСТЕРИКОВ А.В., ХОРЬКОВ К.С., ЕРМОЛАЕВ Г.А., КАЗАНЦЕВ И.С., МАРКЕЕВ А.М., ТИХОНОВСКИЙ Г.В., РОМАНОВ Р.И., ПОПОВ А.А., КАПИТАНОВА О.О., СЮЙ А.В., КОЧУЕВ Д.А., ЛЕКСИН А.Ю., ЦЕЛИКОВ Д.И., АРСЕНИН А.В., КАБАШИН А.В., ВОЛКОВ В.С., ПРОХОРОВ А.В. Перестраиваемые оптические свойства наночастиц дихалькогенидов переходных металлов, синтезированных с помощью лазерной абляции и фрагментации.....	30
ЗИМНЯКОВ Д.А., ВОЛЧКОВ С.С. Индукцированные лазерным излучением вариации макроскопической проводимости в ансамблях полупроводниковых наночастиц вблизи порога протекания: влияние межчастичного и внутрочастичного транспорта носителей заряда.....	32
ПОПОВ С.М., БУТОВ О.В., РЫБАЛТОВСКИЙ А.А., РЯХОВСКИЙ Д.В., ЛИПАТОВ Д.С., ФОТИАДИ А.А., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К. Случайные волоконные лазеры с резонатором на основе иттербиевого оптического волокна с массивом волоконных брэгговских решёток.....	34
ПОЖИДАЕВ Е.П., КОТОВА С.П., САМАГИН С.А., БАРБАШОВ В.А. Жидкокристаллические сегнетоэлектрики как электрооптические среды высокочастотных генераторов вихревых световых полей.....	36
БЕЛЫЙ В.Н., ХИЛО Н.А., РОПОТ П.И., КАЗАК Н.С. Суперпозиции бесселевых световых пучков для оптической связи в свободном пространстве.....	38
БЕЗУС Е.А., ДОСКОЛОВИЧ Л.Л., СКИДАНОВ Р.В., БЛАНК В.А., ГАНЧЕВСКАЯ С.В., ПОДЛИПНОВ В.В., БЫКОВ Д.А., ГОЛОВАСТИКОВ Н.В. Расчёт и исследование «спектральных» дифракционных линз, фокусирующих излучение различных длин волн в различные точки.....	40
ПУТИЛИН А.Н., ДУБЫНИН С.Е., ПУТИЛИН Н.А., КОПЁНКИН С.С., БОРОДИН Ю.П. Особенности работы волноводных голографических мультиплексоров в схемах дисплеев дополненной реальности.....	42
ИВАНОВА Н.А., КЛЮЕВ Д.С. Жидкостные оптические элементы с управляемой формой свободной поверхности.....	44
ЭГАМОВ М.Х., МАХСУДОВ Б.И. Ориентационные эффекты в полимерно-жидкокристаллических дисперсных системах.....	46

КОМЯК К.Г., КАБАНОВА О.С., РУШНОВА И.И., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ТОЛСТИК А.Л. Формирование пространственно структурированных анизотропных дифракционных элементов.....	48
ДЕНИСОВ Д.Г., КАРАСИК В.Е., ПАТРИКЕЕВА А.А. Разработка научных основ и моделирование метода дифференциального рассеяния лазерного излучения для задачи высокоточного контроля параметров шероховатости субнанометрового уровня.....	50
ЗЕМЦОВ Д.С., ЗЕМЦОВА А.К., КОСОЛОБОВ С.С., ЖИГУНОВ Д.М., СМИРНОВ А.С., ТАЗИЕВ К.Р., ПШЕНИЧНЮК И.А., ГАРБУЗОВ К.Н., ДРАЧЕВ В.П. Активные интегральные устройства на платформе кремний-на-изоляторе: температурная и электроабсорбционная модуляция.....	52
КАШАПОВ А.И., БЕЗУС Е.А., БЫКОВ Д.А., ДОСКОЛОВИЧ Л.Л. Пространственно-временное дифференцирование оптических сигналов с помощью слоистых металлодиэлектрических структур.....	54
ПРОКОФЬЕВ Е.В., УЧАНОВА Д.Д., МОСКВИН М.К. Технология записи защитных голограмм на поверхности металла за счёт формирования лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур.....	56
САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., БУРИМОВ Н.И., ДУБИКОВ А.В., БЕЛЬСКАЯ Д.Е., ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЧУВАКОВА М.А. Проводимость регулярных доменных структур в танталате лития, фотоиндуцированная излучением с длиной волны 532 нм.....	58
СУХАНОВ А.Е., ГАЛУЦКИЙ В.В. Модель электрооптического модулятора с заданным концентрационным распределением в кристалле ниобата лития.....	60
КУЗНЕЦОВ И.В., ПЕРИН А.С. Моделирование конвертера поляризации на основе асимметричных тонкоплёночных гребенчатых волноводов.....	62
БЫЧКОВА С.А., МАКСИМОВ Л.В., МИНАКОВ Ф.А., СИНЬКО А.С., КОЗЛОВА Н.Н., НИКОЛАЕВ Н.А. Поляризационная терагерцовая спектроскопия полуорганического кристалла GUNP.....	64
САГАТЕЛЯН Г.Р., САМОРОДОВ А.В., КОНДРАТЕНКО В.С., ПИСКУНОВА Е.Р., КУЗНЕЦОВ А.С. Изготовление цветовой калибровочной меры для компьютеризированного гистологического анализа.....	66
ШУКЛОВ И.А. Химия коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца в золях и тонких плёнках.....	68
ЛАНТУХ Ю.Д. Биополимерная система хитозан – краситель как прототип активной лазерной среды.....	70

КОСОЛАПОВА К.Д., МИРУЩЕНКО М.Д., УШАКОВА Е.В. Исследование оптических свойств и энергетической структуры углеродных точек на основе лимонной кислоты и этилендиамина, обработанных полимерами.....	72
МИЛЕНКОВИЧ Т., ШУКЛОВ И.А., РАЗУМОВ В.Ф. Исследование влияния замены лигандов на свойства фоторезисторов, созданных на основе коллоидных квантовых точек теллурида ртути.....	74
МАРДИНИ А.А., ШУКЛОВ И.А., РАЗУМОВ В.Ф. Синтез и характеристика коллоидных квантовых точек теллурида ртути, полученных с использованием прекурсоров на основе фосфинов.....	76
ШЕСТЕРИКОВ А.В., ГУБИН М.Ю., НОВИКОВ С.М., КИРТАЕВ Р.В., АРСЕНИН А.В., ПРОХОРОВ А.В., ВОЛКОВ В.С. Кросс-поляризационные эффекты в метаповерхностях на основе наноразмерных кремниевых кубоидов с дефектом формы.....	78
УТЮШЕВ А.Д., ГАПОНЕНКО Р.В., ЩЕРБАКОВ А.А. Усиление генерации магнитно-дипольного излучения в присутствии сферической частицы.....	80
КАФЕЕВА Д.А., ЯНДЫБАЕВА Ю.И., ГЛАДСКИХ И.А., ТОРОПОВ Н.А., ВАРТАНЯН Т.А., ДАДАДЖАНОВ Д.Р. Исследование оптической анизотропии серебряных наночастиц в полимерных матрицах.....	82
КАЗАНЦЕВА А.В., ХАРИНЦЕВ С.С. Исследование пространственно-ограниченных полимеров методом термометрии комбинационного рассеяния света.....	84
ВОСКАНЯН Г.Р., КУРОЧКИН Н.С., ГРИЦИЕНКО А.В., СЫЧЕВ В.В., ЕЛИСЕЕВ С.П. Люминесцентная термометрия алмазных центров инфракрасного диапазона.....	86
ДОНЧЕНКО В.А., ЗЕМЛЯНОВ А.А., РЯМБОВ Р.В. Акустические сигналы от водного аэрозоля с наночастицами серебра при облучении фемтосекундными лазерными импульсами.....	88
ПЕТРАШКО Л.Р., ОВЧАРОВ А.В., ЖИГАРЬКОВ В.С. Характеризация металлических наночастиц, образующихся при лазерной биопечати.....	90
МАКИН В.С., МАКИН Р.С. Оптический скирмион как самоорганизационная устойчивая топологическая структура при взаимодействии лазерного излучения с конденсированными средами.....	92
ЕПИФАНОВ Е.О., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Влияние среды сверхкритического CO ₂ на сфокусированный лазерный пучок при абляции.....	94
КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., РУЛЕВ О.А., СИНИЦИН Д.В., ШУТОВ А.В. CO ₂ -лазер атмосферного давления на основе установки для эксимерного лазера.....	96

ПЕРМЯКОВА И.Е., ИВАНОВ А.А., ЧЕРНОГОРОВА О.П. Влияние облучения эксимерным лазером на структуру и свойства аморфных сплавов.....	98
БУРМИСТРОВ Е.Р., АВАКЯНЦ Л.П. Параметры 2ДЭГ в светодиодных гетероструктурах с пятью КЯ/КБ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ по данным THz-TDs.....	100
БАТТАЛОВА Э.И., ХАРИНЦЕВ С.С. Разработка широкополосного светодиода на основе неорганических галогидных перовскитов.....	102
ИСМАИЛ А., ФЕДОРЕНКО А.Ю., ОРЕХОВ И.О., САЗОНКИН С.Г., ОБРАЗЦОВА Е.Д. Исследование эволюции излучения эрбиевого волоконного фемтосекундного лазера с гибридной синхронизацией мод.....	104
У М., БИ Д., КАРПОВ М.А., КУДРЯВЦЕВА А.Д., МИРОНОВА Т.В., ТАРЕЕВА М.В., УМАНСКАЯ С.Ф., ЧЕРНЕГА Н.В., ШЕВЧЕНКО М.А. Управление временными характеристиками когерентного излучения с помощью внутрирезонаторного низкочастотного комбинационного рассеяния света.....	106
ДАНИЛИН А.Н., ЛОБАНОВ В.Е., БИЛЕНКО И.А. Многочастотное затягивание при взаимодействии полупроводникового лазера и высокочастотного микрорезонатора.....	108
ЕГОРОВА К.А., РОЗАНОВ К.А., СИДОРОВА А.Д., ГОРЕНСКИЙ Ф.А., СИНЕВ Д.А. Управляемое изменение твёрдости металлических изделий за счёт лазерной обработки под слоем вспомогательных веществ.....	110
МИНАЕВА Е.Д., АНТОШИН А.А., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Сравнение использования различных профилей распределения энергии лазерного излучения для задачи лазерной биопечати.....	112
САЧЕНКО Д.В. Разработка, производство и сервисное обслуживание лазеров и лазерной техники.....	114
ДРАМПЯН Р., ПАРФЕНОВ В.А. Лазерная реставрационная очистка исторических памятников.....	115
ЖИГАРЬКОВ В.С., ГРОСФЕЛЬД Э.В., АЛЕКСАНДРОВ А.И., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Влияние лазерной биопечати на функциональность клеток.....	117
БОРОДИНА Л.Н., ВЕНИАМИНОВ А.В. Фотоиндуцированное изменение коэффициента диффузии люминесцирующих нанокристаллов в лазерной сканирующей микроскопии.....	119
САЛХАБ М., РАЙАСЕКАРА Ч.Л.Б., ВАСИЛЬЕВ О.С., КАРПОВ О.Н., ПАРФЕНОВ В.А. Восстановление первоначального цвета декоративных изделий из углеродистой стали с помощью лазерной обработки.....	121

ТАРАСОВ И.П., БОРОДИНА Л.Н., ИВАНОВ С.А., ЛИПАТЬЕВ А.С., СИГАЕВ В.Н., НИКОНОРОВ Н.В.	
Запись линейных микроструктур в объёме фототерморелрактивного стекла с помощью ультракоротких импульсов.....	123
БУРЦЕВ А.А., ИОНИН В.В., КИСЕЛЕВ А.В., ЕЛИСЕЕВ Н.Н., МИХАЛЕВСКИЙ В.А., НЕВЗОРОВ А.А., ЛОТИН А.А.	
Изменение проводимости фазоизменяемых материалов под действием импульсного лазерного излучения.....	125
ГРЕСЬКО В.Р., СМИРНОВА В.В., СЕННИКОВА Д.В., СЕРГЕЕВ М.М., ДОЛГОПОЛОВ А.Д.	
Фемтосекундная лазерная модификация свойств ZnO:Ag тонких плёнок.....	127
ЯКУБОВСКИЙ Д.И., АРСЕНИН А.В., ГРУДИНИН Д.В., МИРОНОВ М.С., ВОЛКОВ В.С.	
Ближнеполюная оптическая микроскопия для характеризации ультратонких металлических плёнок.....	129
МУРАТОВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ЧЕХЛОВА Т.К.	
Оптические свойства композитных сред, содержащих золотые частицы различной формы.....	131
НАССЕР Х., АСЕЕВ В.А., ИГНАТЬЕВ А.И., НИКОНОРОВ Н.В.	
Спектры усиления ионов иттербия в хлоридном фототерморелрактивном стекле.....	133
МАЛЫШЕВ О.К., МАРТЫНОВ И.Л., ЧИСТЯКОВ А.А., ГАПОНЕНКО Н.В.	
Математическое моделирование спектров отражения фотонных структур из пористого кремния с учётом окисления.....	135
ШАДРИНА Г.В., БУЛГАКОВ Е.Н.	
Оптическая бистабильность по углу и нарушение симметрии в конечном фотонном кристалле.....	137
ХАРИТОНОВ А.В., МИНИБАЕВ А.И., ХАРИНЦЕВ С.С.	
Метаматериалы с переменными во времени параметрами: дизайн временной неоднородности.....	139
ШУТОВА О.А., ТРУШИН С.М.	
Генерация гармоник атомарными газами в векторных вихревых пучках.....	141
БИКБАЕВ Р.Г., МАКСИМОВ Д.Н., ЧЭНЬ Г.-П., ТИМОФЕЕВ И.В.	
Управление световым пучком с помощью таммовского плазмон-поляритона.....	143
КУЗНЕЦОВ Н.Ю., ГРИГОРЬЕВ К.С., НИКОЛАЕВА И.А., РЯДЧЕНКО А.Е., ПАНОВ Н.А., ШИПИЛО Д.Е., КОСАРЕВА О.Г., КАНДИДОВ В.П., МАКАРОВ В.А.	
Топологические особенности линий сингулярности поляризации света, формируемые при его острой фокусировке.....	145
ХАВРОНИН М.Е., ВИШНЕВЫЙ А.А.	
Эффект Гуса–Хенхен в сингулярной точке отражения.....	147
ГЕЙНЦ Т.А., ГЕЙНЦ И.Ю., ШУТОВА О.А.	
Исследование поляризационных свойств векторного бесселева пучка.....	149

БУРКОВ А.С., ТЕРЕЩЕНКО Н.В., ОБРОНОВ И.В., МЯСНИКОВ Д.В. Исследование фазового профиля и тепловых эффектов в объёмных брэгговских решётках.....	151
ЗАЛОЗНАЯ Е.Д., ДОРМИДОНОВ А.Е., КАНДИДОВ В.П. Формирование фазовых дислокаций при филаментации излучения, сфокусированного аксиконом, в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.....	153
МАКСИМОВ Д.Н., КОСТЮКОВ А.С., ЕРШОВ А.Е., БУЛГАКОВ Е.Н., ГЕРАСИМОВ В.С. Термооптический гистерезис со связанными состояниями в континууме.....	155
ЗАЙЦЕВ В.Д., СТАФЕЕВ С.С. Суперпозиция пучка с линейной поляризацией и цилиндрического векторного пучка в остром фокусе.....	157
РЫЖИКОВ П.С., МАКАРОВ В.А. Влияние нелокальности нелинейного оптического отклика среды на поток углового момента распространяющегося излучения.....	159
АЛЕФЕРКИНА К.Е., РЕМЗОВ А.Д., САВЕЛЬЕВ М.В. Пространственный спектр концентрационной решётки при четырёхволновом взаимодействии в наносuspензии с учётом электрострикции и поля тяжести.....	161
РЯХОВСКИЙ Д.В., ПОПОВ С.М., ИСАЕВ В.А., КОЛОСОВСКИЙ А.О., ВОЛОШИН В.В., ВОРОБЬЁВ И.Л., ЧАМОРОВСКИЙ Ю.К. Массивы волоконных брэгговских решёток, записанные в процессе вытяжки многосердцевинного оптического волокна.....	163
КУЛИКОВА В.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., ДМИТРИЕВ А.А., САВИН В.В., КЛИШИНА В.А., КАЛЯЗИНА Д.В. Способ пассивной термокомпенсации оптических параметров волоконной брэгговской решётки.....	165
ЦЫПКИН В.П., ОСТАПИВ А.Ю., ИВАНОВ Г.Ю., ЛАРИОНОВ И.А., ТЫРТЫШНЫЙ В.А. Взаимное влияние эффектов межмодового и одномодового четырёхволнового смешения оптических импульсов в маломодовом оптическом волокне.....	167
УШАКОВ Н.А., МАКОВЕЦКАЯ Т.А. Спектральная бифотонная интерференция в задачах волоконно-оптических измерений и когерентной оптической томографии.....	169
ЧУВЫЗГАЛОВ А.А., ГИЛЕВ Д.Г., КРИШТОП В.В. Миниатюрный магнитометр на основе оптического резонатора.....	171
СУДАС Д.П., ЯКУЩЕВА Г.Г., КУЗНЕЦОВ П.И. Оптоволоконный рефрактометр на основе многослойных покрытий оксидов олова и титана.....	173
КОМИСАРОВ В.А., ДМИТРИЕВ А.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., КОЗЛОВА А.И., ВОЛОШИНА А.Л. Исследование спектральных и временных характеристик флуоресценции активного оптического волокна, легированного эрбием.....	175

САЕЧНИКОВ А.В., ЧЕРНЯВСКАЯ Э.А., САЕЧНИКОВ В.А. Матрица активных микрорезонаторов для многоканального детектирования антител-маркеров.....	177
ДАНИЛИН А.Н., КОНДРАТЬЕВ Н.М., МИНЬКОВ К.Н. Инжиниринг дисперсии микрорезонаторов нанесением неравномерности на его поверхность.....	179
ШУЛЬГА А.В., ШИЛОВА И.В. Брюстеровские призмы связи для внутривиброакустического возбуждения волноводных мод.....	181
СИНГХ Р. Возможность формирования квантового фантомного изображения с помощью направленного ответвителя.....	183
МОСЕНЦОВ С.Н. Экспериментальный анализ детекторов одиночных фотонов QRate и ID Quantique.....	185
ЗОТОВ А.М., КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т., ПАВЛОВ Н.Н. Особенности распространения световых пучков с мелкомасштабной дислокационной структурой.....	186
ПРОКОПОВА Д.В., АБРАМОЧКИН Е.Г. Исследование распространения в свободном пространстве световых пучков, построенных на основе функций Эйри.....	188
ДЕРГАЧЕВ А.А., ШЛЕНОВ С.А. Формирование и самофокусировка аксиально-несимметричного оптического вихря в зашумлённом пучке.....	190
ЦИПЛАКОВА Е.Г., ПЕТРОВ Н.В., ПЕРРО Ж.-Б., ЧОПАРД А., ГИЙЕ Ж.-П., СМОЛЯНСКАЯ О.А., МОНЕ П. Восстановление фазы терагерцового волнового фронта методом SBMIR с применением техники экстраполяции данных в областях переэкспозиции распределений интенсивности.....	192
ВОХНИК О.М., КОРОЛЕНКО П.В., МОХОВ В.И. Вейвлет-анализ степени пространственной когерентности диспергированных световых пучков.....	194
СПИРИДОНОВ С.И., ЩЕРБАКОВ А.А. Новая формулировка фурье-модального метода без использования факторизации Ли.....	196
ИНКИН М.Г., СКРИПАЛЬ А.В., ДОБДИН С.Ю. Метод измерения расстояния по спектру частотно-модулированного лазерного автодина.....	198
ГЕОРГИЕВА А.О., ЕЗЕРСКИЙ А.С., ЧЕРНЫХ А.В., ПЕТРОВ Н.В. Численное смещение плоскости формирования целевого волнового фронта в схеме независимой амплитудно-фазовой модуляции.....	200
МИНИНА О.В., ГЕЙНЦ Ю.Э., ЗЕМЛЯНОВ А.А. Управление распространением мощных фазомодулированных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе.....	202

НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ТРЕТЬЯКОВ Д.А. Цифровая предобработка в линеаризации аналоговых оптических СВЧ-трактов.....	204
ГОНЧАРОВ Ф.М., ПЕРВУШИН Б.Е., НАСЕДКИН Б.А. Оптимизация частоты посылки опорных импульсов для квантового распределения ключа на непрерывных переменных.....	206
БРАГИН И.О., ЮШИЦЫНА В.В. Защищённый канал связи на основе квантового распределения ключей.....	208
ПАНТЕЛБЕВА Е.П., КАБАНОВА О.С., МЕЛЬНИКОВА Е.А. Поляризационно-голографическая запись жидкокристаллических дифракционных решёток.....	210
КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В., ЗЕНКИНА А.А., БЕЛОУСОВА А.С. Двухканальная фурье-обработка двумерных изображений с использованием многократной брэгговской дифракции.....	212
ФИЛАТОВ А.Л., ЛУКАНИНА В.М. Перспективы применения акустооптических фильтров в геостационарном детекторе молний космического базирования.....	214
ЦВЕТКОВ М.В., ПАВЛОВ И.Н. Использование источника некогерентного света в методе нарушенного полного внутреннего отражения.....	216
АЛОНОВА М.В., ЗИМНЯКОВ Д.А., СКРИПАЛЬ А.В., УЛЬЯНОВА О.В., ФЕДОРОВА В.А. Поляризационное кодирование структуры последовательностей нуклеотидов в секвенированных фрагментах ДНК микроорганизмов: перспективы применения в биоинформатике.....	218
ЧЕРЕШНЕВ В.О., ПРОСКУРИН С.Г. Исследование закономерностей распределения спеклов в фантомах биологических тканей в оптической когерентной томографии.....	220
ПАВЛОВ П.В., ВЛАДИМИРОВ А.П., СТЕПАНОВ А.Р. Определение величины перемещения диффузных объектов по анализу параметров цифровых спекл-фотографий.....	222
ПРОХОРЕНКОВ Н.О., ВОЛЫНСКИЙ М.А. Исследование тонопередачи от тест-объекта к изображению при записи цифровой голограммы на нескольких длинах волн.....	224
ИВАНОВ П.А. Методы корреляционного распознавания изображений с помощью инвариантных MOSSE-фильтров.....	226
ГАУГЕЛЬ А.О., ПАВЛОВ А.В. Аппроксимация передаточной характеристики схемы голографии Фурье для высокочастотных голограмм.....	228
САЕЧНИКОВ И.В., СКАКУН В.В., ЧЕРНЯВСКАЯ Э.А. Комбинированный метод идентификации и семантического анализа динамических объектов в оптическом потоке на базе машинного обучения..	230

РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Синтез киноформов трёхмерных сцен на основе машинного обучения.....	232
ГОРЯЕВ М.А. Влияние красителя на фотоЭДС кремниевой n-p-n+ структуры.....	234
МАХМАНОВ У.К., ЭСАНОВ Ш.А., МУСУРМОНОВ К.Н., ШУКУРОВ А.Х., ДУСОВ Й., ЭШБОВЕВ С. Оптические и структурные свойства фуллерена C ₆₀ в бинарных растворителях.....	236
БЕЗРУКОВ П.А., НАЩЕКИН А.В., СИДОРОВ А.И. Квантовая эффективность фотокаталитического разложения воды при изменении условий синтеза нанопористых слоёв йодида меди.....	238
БОЙЧЕНКО А.П., ЛИФИРЕНКО В.А. Влияние предварительной термообработки алюминия на кинетику электролюминесценции его оксида при анодировании в дистиллированной воде.....	240
ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А., ДАЙБАГЕ Д.С., СЕЛЮКОВ А.С., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ГЕХТ М.Э., РЫЖОВ А.В., ПЕВЦОВ Н.В., ПЕВЦОВ Д.Н. Люминесценция комплексов европия (III) с β-дикетонами и карбоновыми кислотами.....	242
ИЗМАЙЛОВА Н.В., САМСОНОВА Л.Г. Исследование люминесцентных свойств органических молекул с термально активированной замедленной флуоресценцией в OLED.....	244
ЛЕТУТА С.Н., ИШЕМГУЛОВ А.Т. Кинетика триплет-триплетного поглощения молекул при двухквантовом возбуждении.....	246
ЧЕРНОВ Д.В., БОЙЧЕНКО А.П. Программно-аппаратное управление анодированием металлов по их электролюминесценции.....	248
БАРАНОВ К.Н., КАРАМЫШЕВА С.П., ОРЛОВА А.О., РЕЗНИК И.А. Исследование оптических свойств квантовых точек AgInS ₂ , сформированных в микрофлюидном чипе.....	250
ОСКОЛКОВА Т.О., МАТЮШКИНА А.А., СЕВИД Ф.А., ОРЛОВА А.О. Оптические свойства полимерных нанокомпозитов на основе квантовых точек AgInS ₂ /ZnS и молекул фотосенсибилизатора.....	252
ЕВСТРОПЬЕВ С.К., САРАТОВСКИЙ А.С., БУЛЫГА Д.В., СТОЛЯРОВА В.Л., КНЯЗЯН Н.Б. Люминесцентные золь-гель MgO-Al ₂ O ₃ -ZrO ₂ -SiO ₂ :Mn ²⁺ материалы.....	254
САННИКОВА М.Д., МАРАСАНОВ Д.В., СГИБНЕВ Е.М., КУЛЬПИНА Е.В., МИРОНОВ Л.Ю. Механизм тушения люминесценции кластеров серебра в силикатном стекле.....	256

МАРАСАНОВ Д.В., САННИКОВА М.Д., КУЛЬПИНА Е.В., СГИБНЕВ Е.М., МИРОНОВ Л.Ю.	
Влияние ионов сурьмы на спектрально-люминесцентные свойства кластеров серебра в ионообменном слое натриевосиликатного стекла.....	258
СЛОБОЖАНИНОВ А.А., МАРАСАНОВ Д.В., КУЛЬПИНА Е.В., САННИКОВА М.Д., ХАРИСОВА Р.Д., СГИБНЕВ Е.М., МИРОНОВ Л.Ю.	
Исследование фотодеградации люминесценции кластеров серебра в стекле.....	260
ГУЩИН С.В., КУЗНЕЦОВ С.В., ЛЯПИН А.А., ПРОЙДАКОВА В.Ю., РЯБОЧКИНА П.А., ФЕДОРОВ П.П.	
Увеличение интенсивности ап-конверсионной люминесценции люминофоров SrF ₂ :Ho за счёт солегирирования ионами Yb ³⁺ при возбуждении двухмикронным лазерным излучением.....	262
ГАВРИЛОВА М.А., ШЕЛЕМАНОВ А.А., ГАВРИЛОВА Д.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К.	
Влияние морфологии на люминесцентные и адсорбционные свойства нанокристаллического ZnO.....	264
ГЕЙНЦ Ю.Э., ПАНИНА Е.К.	
FDTD-моделирование поглощения ИК-излучения сферической микрокапсулы в окружении твёрдых наночастиц.....	266
БУЛЫГА Д.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ГАВРИЛОВА Д.А., МУССАУИ А.	
Исследование структурных и люминесцентных свойств нанопорошков Y ₂ O ₃ -Gd ₂ O ₃ :Ce ³⁺ , синтезированных полимерно-солевым методом.....	268
КУЗЬМЕНКО Н.К., КОЛОБКОВА Е.В., ЛОГУНОВ Л.С., НИКОНОРОВ Н.В., МАКАРОВ С.В.	
Исследование спектрально-люминесцентных свойств нанокристаллов перовскита во фторфосфатной матрице, полученных методом фотоиндуцированной кристаллизации.....	270
БУЛЫГА Д.В., ГАВРИЛОВА Д.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ВОЛЫНКИН В.М.	
Влияние изоморфного замещения Y ³⁺ на Gd ³⁺ в нанокристаллических порошках YAG:Ce ³⁺ на их структурные и люминесцентные свойства.....	272
БУХАРОВ Д.Н., САМЫШКИН В.Д., ЛЕЛЕКОВА А.Ф., АБРАМОВ А.С.	
Моделирование фотоэлектрических свойств тонкой С-Аu плёнки.....	274
МУСАБЕКОВА Э.К., АЙМУХАНОВ А.К., ЖАҚАНОВА А.М., КОМАНДИР Б.	
Влияние структурных особенностей SnO ₂ на электрофизические свойства плёнок.....	276
ДАЙБАГЕ Д.С., ЗАХАРЧУК И.А., ОСАДЧЕНКО А.В., СЕЛЮКОВ А.С., АМБРОЗЕВИЧ С.А., СКОРИКОВ М.Л., ГЕХТ М.Э., ВАСИЛЬЕВ Р.Б.	
Спектральные проявления квантоворазмерного эффекта в ультратонких нанопластинах селенида кадмия.....	278
ВАСИЛЮК Г.Т., КАРПАЧ П.В., МАСКЕВИЧ А.А., ГЛЕБОВИЧ Т.С., АЙТ А.О., ВЕНИДИКТОВА О.В., ВАЛОВА Т.М., МАСКЕВИЧ С.А.	
Проявление фотохромизма в спектрах ИК-поглощения нанокомпозитов на основе диарилэтена и наночастиц серебра.....	280

КАРПАЧ П.В., ВАСИЛЮК Г.Т., ГОГОЛЕВА С.Д., ОЖОГИН И.В., ПУГАЧЕВ А.Д., ЛУКЪЯНОВ Б.С., МАСКЕВИЧ С.А. Усиление комбинационного рассеяния света в нанокompозитах на основе бис-спиропирана и наночастиц серебра.....	282
ГЕЙНЦ Ю.Э., ПАНИНА Е.К., ПАНИН К.С. Влияние малых искажений поверхности диэлектрических микросфер на параметры формируемых фотонных наноструй.....	284
ЭГБАЛИ А., ВИШНЕВЫЙ А.А. Оптические свойства радиально анизотропных наносфер.....	286
ЛОЗОВОЙ К.А., ДИРКО В.В., КУКЕНОВ О.И., КОХАНЕНКО А.П. Температурные особенности сверхструктурных переходов при росте наноструктур Ge/Si (111).....	288
КРОЛЬ И.М., РУНИНА К.И., ПИЯКИНА А.А., ЩИГОЛЕВА Е.М., БАРИНОВА О.П. Особенности строения и оптических характеристик кобальтсодержащих стёкол составов ZnO-B ₂ O ₃ -SiO ₂ и K ₂ O-ZnO-SiO ₂	290
ПЕСНЯКОВ В.В., ИГНАТЬЕВ А.И., НИКОНОРОВ Н.В. Исследование влияния термической обработки на формирование гибридных наноструктур Ag-NaBr/AgBr в бромидных фототерморефрактивных стёклах, активированных ионами иттербия.....	292
КУЛЬПИНА Е.В., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С. Исследование структуры литий-цинк-германатных стеклокерамик с марганцем.....	294
МИХАРЕВ Е.А., ЛУНЁВ А.Ю., СИДОРОВ А.И. Математическое моделирование микрорезонаторов из ФТР-стекла с молекулярными кластерами серебра для исследования процессов лазерной генерации.....	296
ЛУНЁВ А.Ю., МИХАРЕВ Е.А., СИДОРОВ А.И. Численное моделирование дисперсии в микросферическом резонаторе из силикатного стекла с наночастицами полупроводниковых оксидов.....	298
ИЗБАСАРОВА Э.А., ХАРИНЦЕВ С.С. Оптический нагрев кремниевых АСМ-кантилеверов.....	300
ГОРБАТОВА А.В., БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д. Гетероструктура Co/ДППМ для терагерцового спинтронного эмиттера: анализ оптического поглощения в ферромагнитном слое для эффективной терагерцовой эмиссии.....	302
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., ДЗЯДУХ С.М., ГОРН Д.И., МИХАЙЛОВ Н.Н., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МЕНЬШИКОВ Р.В., СИДОРОВ Г.Ю., УЖАКОВ И.Н., ЯКУШЕВ М.В. Электрофизические характеристики униполярных NBN-структур на основе HgCdTe со сверхрешёткой в барьерной области.....	304
ЛЕВКОВСКАЯ В.М., ХАРИТОНОВ А.В., ХАРИНЦЕВ С.С. Термометрия неоднородно нагретых наноструктур на основе спектроскопии комбинационного рассеяния света.....	306

ЛЕБЕДЕВА Е.Д., БУРЯКОВ А.М., АВДЕЕВ П.Ю., ГОРБАТОВА А.В. Исследование параметров терагерцового излучения в структурах Co/WSe ₂ и Co/IrMn ₃	308
ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г., МУШИН Ф.Ю. Взаимодействие одномерных поверхностных плазмонов с органическими молекулами диэлектрического сердечника нанопроволоки.....	310
МАЙДЫКОВСКИЙ А.И., МАМОНОВ Е.А., НОВИКОВ В.Б., МУРЗИНА Т.В. Картирование доменной структуры поверхностного слоя феррит-граната методом микроскопии оптической второй гармоники.....	312
КРУЧИНИН Н.Ю., КУЧЕРЕНКО М.Г. Конформации однородно заряженных полипептидов на поверхности поляризованного сплюснутого плазмонного наносфероида.....	314
АВДЕЕВ П.Ю., ГОРБАТОВА А.В., БЕЗВИКОННЫЙ Н.В., ЛЕБЕДЕВА Е.Д., ОВЧАРЕНКО С.В., БУРЯКОВ А.М. Влияние интерфейса гибридного спинтронного эмиттера на эффективность генерации терагерцового излучения.....	316
ГАЗИЗОВ А.Р., САЛАХОВ М.Х., ХАРИНЦЕВ С.С. Оптомеханическое охлаждение гармонического осциллятора с помощью гигантского комбинационного рассеяния.....	318
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В., АНДРЕЕВА О.Б. Рекомбинационное свечение и комптоновское фотовозбуждение при рассеянии фотона атомным ионом.....	320
ДАЩИНСКИЙ А.А., КОРЕЦ Д.А., ФИЛАТОВ В.В. Бозе-эйнштейновская конденсация света в фотонных кристаллах.....	322
АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А. Сравнительный анализ параметров Na-Ag и Cs-Ag резонансной фотоплазмы.....	324
МАНДУР М.М., АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А. Влияние столкновительного уширения D1 и D2 линий Na на характеристики Na-Ag фотоплазмы.....	326
АЛИМКИНА И.С., ФИЛАТОВ В.В. Нелинейный оптический эффект в рубине.....	328
МАЛЕЦ М.А., ЧИНЬ Н.Х., ФОКИНА М.А., ПАТАПОВИЧ М.П. Изучение возможности создания газочувствительных сенсоров методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии.....	330
ЧИНЬ Н.Х., МАЛЕЦ М.А., ПАТАПОВИЧ М.П. Напыление нанокластеров композиционных материалов на поверхность стекла при лазерной абляции мишени.....	332
ЧИНЬ Н.Х., ЯГЕЛО А.Е., ПАТАПОВИЧ М.П. Процесс плазмообразования вблизи поверхности многокомпонентных сплавов при лазерной абляции.....	334
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В. Оценка применимости оптического излучения для удержания плазмы в установках термоядерного синтеза.....	336

КОЖЕВНИКОВ В.А., ПРИВАЛОВ В.Е. Мощность излучения He-Ne лазера с эллиптическим сечением трубки с учётом изменения инверсии населённостей на оси.....	338
КОЖЕВНИКОВ В.А., АПУШКИНСКИЙ Е.Г., БИРЮКОВ А.М. Усиление He-Ne лазера с экзотическим сечением активного элемента.....	340
АХМЕТОВА О.А., ЗЕМЛЯНОВ А.А., МИНИНА О.В. Оценки интенсивности в точках начала останковки коллапса и нелинейного фокуса при распространении мощного фемтосекундного лазерного излучения.....	342
АНДРЕЙЧИКОВ К.С., ВОВЧЕНКО Е.Д., ГЕРАСИМОВ И.А., МЕЛЕХОВ А.П., РАМАКОТИ Р.Ш., САЕНКО С.В., САЛАХУТДИНОВ Г.Х., СРЕДИН В.Г. Влияние облучения мягким рентгеновским излучением на вольт-фарадные характеристики плёночных структур на основе антимонида индия.....	344
МОЖАЕВА М.Д., КОРШУНОВ А.А., ГАРМАТИНА А.А., ГОРДИЕНКО В.М., ДЫМШИЦ Ю.М., КОЛДАЕВ В.В., ДЬЯЧКОВА И.Г., АСАДЧИКОВ В.Е., МИНАЕВ Н.В. Генерация рентгеновских импульсов при воздействии острогофокусированного излучения волоконного лазера на медную мишень: к созданию микрофокусного рентгеновского источника.....	346
КОРШУНОВ А.А., МОЖАЕВА М.Д., ГАРМАТИНА А.А., ГОРДИЕНКО В.М., ДЫМШИЦ Ю.М., КОЛДАЕВ В.В., ДЬЯЧКОВА И.Г., АСАДЧИКОВ В.Е., МИНАЕВ Н.В. Технические аспекты разработки источника характеристического рентгеновского излучения на основе фемтосекундного волоконного лазера с оценкой размера источника.....	348
ВАСИЛЬЕВА А.В., КАРЕВА А.К., ПАРФЕНОВ В.А. Комбинированная методика очистки многослойного окрашенного гипсового барельефа.....	350
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., МАРКОВА Л.В., РУТКОВСКАЯ Л.С., ЗАЖОГИН А.П. Исследования процессов синтеза нанопорошков-прекурсоров для получения нанокерамик типа $MgAl_2O_4$, допированных Fe, при воздействии на сплавы AMg_2 и Mg_{95} сдвоенными лазерными импульсами в атмосфере воздуха.....	352
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., МАРКОВА Л.В., РУТКОВСКАЯ Л.С., ЗАЖОГИН А.П. Исследования процессов синтеза наноплёнок-прекурсоров для получения нанокерамик типа $CuAlO_2$, допированных Mg, при воздействии на сплавы AMg_2 и M_2 сдвоенными лазерными импульсами в атмосфере воздуха.....	354
ЛЕБЕДЕВА Я.С., СМАЕВ М.П., БУДАГОВСКИЙ И.А., ЛАЗАРЕНКО П.И. Лазерная кристаллизация тонких плёнок аморфных халькогенидов $Ge_2Sb_2Te_5$ и Sb_2Se_3	356
ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П. Изучение распределения железоникелевых фаз в метеорите Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии.....	358

ОРЕХОВА Н.А., ПУХТЕЕВ А.О., ХАРИТОНЧИК Р.А., ЗАЖОГИН А.П. Исследование образца железного метеорита методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии.....	360
ОЛЬХОВА А.А., ПАТРИКЕЕВА А.А., ДУБКОВА М.А., СЕРГЕЕВ М.М. Лазерная обработка полупроводниковых плёнок PbSe непрерывным и импульсным излучением для улучшения фоточувствительных характеристик детектора для приложений газового анализа.....	362
ЕГОРОВ А.Н., МАВРИЦКИЙ О.Б., ХОЛИНА М.С., ЗЕНКЕВИЧ А.В., ВОЛОДИНА Н.О. Моделирование импульсного лазерного отжига сегнетоэлектрических структур на основе NZO.....	364
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., РУТКОВСКАЯ Л.С., ЗАЖОГИН А.П. Исследование процессов получения газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных цинком, при лазерном распылении меди и цинка в атмосфере воздуха.....	366
КОВАЛЕНКО М.Н., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., РУТКОВСКАЯ Л.С., ЗАЖОГИН А.П. Исследование процессов получения газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди, легированных железом, при лазерном распылении меди и железа в атмосфере воздуха.....	368
ТИТОВЕЦ П.А., КАЗАНЦЕВ С.Ю., СМОЛЬСКИЙ А.А. Стенд для исследования элементов адаптивных антенн с лазерным управлением.....	370
МИНАЕВ С.Е., МИНАЕВА Е.Д., НИКИТИН Н.С., ГУЛЯШКО А.С., ЛАРИОНОВ И.А., ТЫРТЫШНЫЙ В.А., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Воздействие импульсного лазерного излучения 3 мкм на биоткань.....	372
ЯНДЫБАЕВА Ю.И., ЛИ Ч., КАФЕЕВА Д.А., КЕСАЕВ В.В., АНДРЕЕВА О.В., ЗАКОЛДАЕВ Р.А. Прямая лазерная запись двулучепреломляющих структур в нанопористой силикатной матрице.....	374
НЕЕЛОВА А.Д., ШЕПИЛОВА Е.М., НОСОВА Е.И., РОНГОНЕН С.Л., ПАРФЕНОВ В.А. Исследование химических и механических свойств бумаги после лазерной очистки.....	376
ШИШКИНА А.С., АНДРЕЕВА О.В., ЗАКОЛДАЕВ Р.А. Формирование оптофлюидных микроканалов в пористом стекле ультракороткими лазерными импульсами.....	378
ТИТОВЕЦ П.А., ФЕДЮК М.О., СМОЛЬСКИЙ А.А. Экспериментальное исследование поглощения оптического излучения разных длин волн в пресной воде и атмосфере.....	380
СЕДОВА Ю.К., МИНАЕВА С.А., ВИНАРОВ А.З., МИНАЕВ Н.В. Исследование почечных камней с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния.....	382

СКРЫБЫКИНА А.А., КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С. Разработка жидких оптических фантомов биоткани для задач широкополосной спектроскопии.....	384
БЕРДЫБАЕВА Ш.Т., ТЕЛЬМИНОВ Е.Н., СОЛОДОВА Т.А. Волноводный лазерный сенсор на красителе «Нильский красный».....	386
ЯКИМУК В.А., АЛСАИФ Я., АНДРЕЕВА О.В., ЗАКОЛДАЕВ Р.А. Сенсорные свойства оптического волновода в нанопористой среде.....	388
АВРАМЧИКОВ М.О., ГУРЬЕВ Д.А., НИКОЛАЕВ Н.Э., ПУСТОВАЛОВ А.В., РАВИН А.Р., ЦВЕТКОВ В.Б., ЧЕХЛОВА Т.К. Диффузионные оптические волноводы в силикатном и фосфатном неодимовом стекле.....	390
СЕМИН Н.С., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КОВАЛЕВ В.И., СЕЛЕЗНЕВ Л.В., КОРИБУТ А.В., ДУНАЕВА Е.Э., ИОНИН А.А. Вынужденное комбинационное рассеяние чирпированных импульсов титан-сапфирового лазера в шеелитоподобных кристаллах.....	392
СУББОТИН К.А., ТИТОВ А.И., ЛИС Д.А., ЗИМИНА Ю.И., ДИДЕНКО Я.С., ЭЛАБЕДИН Г.З., ЕРЕМЕЕВ К., СОЛЕ Р.М., АГУИЛО М., ВОЛКОВ П.А., ПОПОВ П.А., ЧЕРНОВА Е.В., ДИАЗ Ф., КАМИ П., МАТЕОС Х., ЛОЙКО П.А. Рост, структура, тепловые свойства и спектроскопия монокристалла MgMoO ₄ , легированного ионами Tm ³⁺	394
АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф. Комбинационное рассеяние света в кристаллах ниобата лития с примесями переходных металлов.....	396
ТОККО О.В., КАДЕТОВА А.В., ПРУССКИЙ А.И., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Рентгенографические исследования кристаллов LiNbO ₃ :Mg, Zn, полученных методом прямого и гомогенного легирования.....	398
СОСУНОВ А.В., ПЕТУХОВ И.В., ПОНОМАРЕВ Р.С., КУНЕВА М. Исследование структуры монокристаллов ниобата лития методом рентгеновской компьютерной томографии.....	400
АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф., АНИКЬЕВА Э.Н. Аномалии теплоёмкости и плотность состояний в кристаллах ниобата лития с дефектами стехиометрии.....	402
СМИРНОВ М.В., ТИТОВ Р.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ТЕПЛЯКОВА Н.А. Оптические свойства кристаллов LiNbO ₃ , легированных катионами Zn ²⁺ и V ³⁺	404
АНИКЬЕВ А.А., УМАРОВ М.Ф., АНИКЬЕВА Э.Н. Флуктуации фоновой плотности в ниобате лития в окрестности фазового перехода.....	406
БОБРЕВА Л.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Особенности формирования комплексных дефектов в кристаллах LiNbO ₃ :Gd:Mg.....	408
МУРАВЬЕВ И.А., ГРЕЧИН С.Г. Температурные зависимости фазосинхронных свойств кристалла ВВО.....	410

НАВНЫКО В.Н., БЛОЦКАЯ Д.С., КУЛАК Г.В., ШАНДАРОВ С.М. Самодифракция световых волн при их встречном взаимодействии в кристалле GaAs среза (001)	412
ДАВЫДОВСКАЯ В.В., НАВНЫКО В.Н. Особенности взаимодействия двумерных супергауссовых пучков в упорядоченных массивах в фоторефрактивном кристалле SBN.....	414
ДЮ В.Г., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М., КАРГИН Ю.Ф. Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$	416
НИЧИПОРКО С.Ф. Влияние внешнего электрического поля на энергообмен при двухволновом взаимодействии в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (111)	418
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВ А.М., МОЛЧАНОВ С.В., СТЕПАНОВ В.С. Влияние кристаллографических направлений на параметры шероховатости полированных поверхностей парателлурита.....	420
ШЕВЧЕНКО О.Н., МИКЕРИН С.Л., КОХ К.А., НИКОЛАЕВ Н.А. Перспективы применения кристаллов GaSe:S для телекоммуникационных систем следующего поколения.....	422
АНИКЬЕВ А.А., БАРЫШНИКОВ Н.В., АНИКЬЕВА Э.Н. Движение волнового пакета в потенциалах различной формы.....	424
РУЖИЦКАЯ Д.Д., МИНЬКОВ К.Н. Методика изготовления ультракомпактных высокодобротных кристаллических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи.....	426
ПАНТЕЛЕЕВА Е.П., КАБАНОВА О.С., МЕЛЬНИКОВА Е.А. Возбуждение поляризационных мод в системе оптически связанных жидкокристаллических волноводов.....	428
ГАТАУЛЛИНА Ю.Р., МУХИН Ю.В., КУНДИКОВА Н.Д. Поляризационные эффекты на границах анизотропных сред.....	430
ВАНИН А.И., СОЛОВЬЕВ В.Г., ЦВЕТКОВ А.В., ЯНИКОВ М.В. Поверхностные плазмон-поляритоны в металлodieлектрических структурах на основе опалов.....	432
РЫБАК А.А., КУЗНЕЦОВ С.А., НИКОЛАЕВ Н.А. Дизайн терагерцового фильтра с шириной полосы менее 4 % на базе частотно-избирательных поверхностей.....	434
КОСТРОМЫКИНА В.В., РОГОЖНИКОВ Г.С. Модель условно-свободного пространства в задачах дистанционного зондирования в терагерцовом диапазоне частот.....	436
АКМАЛОВ А.Э., КОЗЛОВСКИЙ К.И., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., ЛАРИОНОВ С.А., МАКСИМОВ Е.М., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А. Оптические элементы для терагерцового диапазона, созданные с помощью 3D-печати.....	438

НИКОЛАЕВА И.Н., РОГОЖНИКОВ Г.С. Исследование возможности использования ПЗС- и КМОП-устройств для регистрации терагерцового излучения в задачах дистанционного зондирования.....	440
ГАВРУШКО В.В., КАДРИЕВ О.Р., ЛАСТКИН В.А. Особенности диаграммы направленности дифференциальных фотоприёмников.....	442
КОНРАДИ Д.С., СРЕДИН В.Г. Моделирование низкоэнергетической внеосевой засветки ИК матричного фотоприёмника.....	444
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И. Динамика квазинепрерывной волны в активном неоднородном световоде....	446
КАЛЯЗИНА Д.В., ВАРЖЕЛЬ С.В., ДМИТРИЕВ А.А., ВАРЖЕЛЬ А.С., КУЛИКОВА В.А. Исследование влияния температурного отжига на спектральные характеристики волоконной брэгговской решётки.....	448
БАБКИН О.Э., БАБКИНА Л.А., ИЛЬИНА В.В. Толстослойные покрытия оптического волокна.....	450
ПЧЕЛКИН Г.А., ХОХЛОВ А.В., ТЕР-НЕРСЕСЯНЦ Е.В., БУРДИН А.В., ДЕМИДОВ В.В., МАТРОСОВА А.С. Исследование характеристик маломодовых киральных микроструктурированных оптических волокон с шестью сердцевинами.....	452
БОГАЧКОВ И.В. Исследования спектра бриллюэновского рассеяния в оптическом волокне «DRAKA».....	454
ЛУЦЕНКО А.С., КОНИН Ю.А. Взаимодействие в оптическом волокне встречных импульсов с энергией выше пороговой.....	456
ЗАЙЦЕВ А.И., КАЗАНЦЕВ С.Ю., ФРОЛОВ А.А., ФЕДЮК М.О., ЕГОРОВА О.Н., ЖУРАВЛЕВ С.Г., СЕМЁНОВ С.Л. Влияние перекрестных помех от модулированного лазерного излучения на квантовый канал связи в многосердцевинном волокне.....	458
БОГАЧКОВ И.В. Характеристики рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов.....	460
ГАРКУШИН А.А., НИФОНТОВА Е.В., РАСУЛЕВ Р.П., КРИШТОП В.В., ГАРИПОВА М.А., ЗУЕВА П.В., ВОЛЬХИН И.Л., СТОРОЖЕВ С.А., ХИЖНЯКОВ Ю.Н. Измерение характеристик прототипа системы передачи энергии через оптоволокно мощностью до 5 Вт.....	462
БОГАЧКОВ И.В. Исследования характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптическом волокне со смещённой длиной волны отсечки.....	464

БОГАЧКОВ И.В. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.657.....	466
БОГАЧКОВ И.В. Исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.652 с длиной волны отсечки 1235 нм.....	468
БОГАЧКОВ И.В. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.652 с длиной волны отсечки 1305 нм.....	470
САВИН В.В., КОННОВ К.А., КОННОВ Д.А., КОЗЛОВА А.И., КУЛИКОВА В.А., ВОЛОШИНА А.Л. Разработка и исследование внутриволоконного ответвителя для контроля мощности излучения.....	472
ВЕКШИН М.М., ЯКОВЕНКО Н.А. Разработка волоконно-оптических 3D-разветвителей на основе эффекта межмодовой интерференции.....	474
КОЗЛОВА А.И., МООР Я.Д., ВАРЖЕЛЬ С.В., ВОЛОШИНА А.Л., САВИН В.В., КОМИСАРОВ В.А. Разработка и исследование волоконно-оптической системы динамического измерения веса автотранспорта.....	476
ЯНУКОВИЧ Т.П., ИСМАЙЛОВА А.С., ДЖУНГ А.Д. Математическое моделирование оптоволоконного сенсора силы тока.....	478
КЛИШИНА В.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., КУЛИКОВА В.А., СКОВОРОДКИНА М.В. Разработка волоконно-оптического чувствительного элемента датчика скорости и направления потока.....	480
СУДАС Д.П., ГОЛАНТ К.М. Эффект оптического пинцета в волоконных рефрактометрах.....	482
ШУРУПОВ Д.Н., ПЧЕЛКИН Г.А., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., БУЛЫГА Д.В., МУССАУИ А., ДЕМИДОВ В.В. Люминесцентные волоконно-оптические датчики новой конструкции для высокотемпературных измерений.....	484
ВОЛОШИНА А.Л., ДМИТРИЕВ А.А., ВАРЖЕЛЬ С.В., КОЗЛОВА А.И., САВИН В.В., КОМИСАРОВ В.А. Разработка и исследование чувствительного элемента амплитудного волоконно-оптического датчика температуры.....	486
ХОМУТИННИКОВА Л.Л., МЕШКОВСКИЙ И.К., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., ЛИТВИНОВ М.Ю., ПЛЯСЦОВ С.А., БЫКОВ Е.П. Детектирование метана волоконно-оптическим сенсором при применении фотокатализатора ZnO-SnO ₂ -Fe ₂ O ₃	488
МУРАШКИНА Т.И., ПАРШИКОВА Т.В., ПЛОТНИКОВА Е.Ю. Определение размеров и конфигурации нёба пациента с помощью волоконно-оптического сканера.....	490

БОЛОТОВ Д.В., КАЗАНЦЕВ С.Ю., КОЛЕСНИКОВ О.В., КОМАРОВ О.А. Защита волоконно-оптических линий связи от воздействий атмосферных разрядов.....	492
БЕЗБОРОДОВА Е.С., ХОМЧЕНКО Н.В. Оценка дисперсии сигнала в волоконно-оптической линии связи с учётом спектральной зависимости показателя преломления.....	494
БОГАЧКОВ И.В. Автоматизация обработки бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон, находящихся в различных состояниях.....	496
БОБЕ А.С., ВОЗНЕСЕНСКАЯ А.О. Исследование оптических систем проточного анализа промышленных систем для задач автоматизации и мониторинга.....	498
КОСТРИЦКИЙ С.М., ЯЦЕНКО А.В., ФЕДОРОВ В.А. Влияние пироэлектрического эффекта на работу многофункционального интегрально-оптического элемента.....	500
ПЕТРОВ В.М., СЕМИСАЛОВ Д.В., ХЛУСЕВИЧ Д.С., ЯКОВЛЕВ М.И. Разработка и создание квантового CNOT-гейта на основе интегрально-оптических интерферометров Маха–Цендера.....	502
ВЕКШИН М.М., КУЛИШ О.А., ЯКОВЕНКО Н.А. Разработка интегрально-оптических направленных ответвителей в стекле для квантовых логических элементов.....	504
ИБРАГИМОВ Р.З. Синхронизация опорного гетеродина в когерентном оптическом приёмнике с многоуровневым форматом модуляции.....	506
БОГАЧКОВ И.В. Разработка тестирующей программы для контроля знаний студентов по волоконно-оптическим телекоммуникационным системам.....	508
ГОНЧАРОВ Р.К., БОЛЫЧЕВ Е.А., ИВАНКОВ Н.А., СЕНИК К.А. Полуопределённое программирование в приложении к системам квантового распределения ключа.....	510
БОЛОТОВ Д.В., ЕРОХИН К.Ю., КАЗАНЦЕВ С.Ю., КОЛЕСНИКОВ О.В., КУЗНЕЦОВ С.Н. Возможности применения НОК EMQOS 1.0 для исследования технологии квантового распределения в свободной атмосфере.....	512
САНТЬЕВ А.А., ЕГОРОВ В.И. Многопользовательская квантовая сеть для интернета вещей на основе систем квантового распределения ключей на боковых частотах.....	514
БАХУС А.В., БОЛТАНСКИЙ М.В., ТРОФИМОВ Н.С., ШАХОВОЙ Р.А. Реализация квантового генератора случайных чисел.....	516
БОЛТАНСКИЙ М.В., БАХУС А.В., ШАХОВОЙ Р.А., ТРОФИМОВ Н.С., ЧЕХЛОВА Т.К. Постобработка и анализ выходных данных квантового генератора случайных чисел.....	518

ВОРОНЦОВА И.О., ГОНЧАРОВ Р.К., ТУПЯКОВ Д.В., КИСЕЛЕВ Ф.Д. Численное моделирование схемы квантового повортителя на когерентных состояниях.....	520
ГОМОНОВ Д.Н., СОБОЛЕВ К.В. Концепция городской защищённой пассивной оптической сети.....	522
ПРОНИН А.А., ПЧЕЛКИНА Н.В., УСАЧЕВ К.П., ЧИЖ С.А. Перспективы применимости коммерческих атмосферных оптических линий связи.....	524
КУЗЬМИН М.С., ПЧЕЛКИНА Н.В., НАСАРАИА А.П., КУЗЬМИН Д.С., КУЗНЕЦОВ С.Н. Корреляция потерь в квантовом и информационном каналах в атмосферных оптических линиях связи с квантовым распределением ключей.....	526
ЯКУШЕНКОВ П.О. Метод расчёта слоистых структур типа SESAM для скрипта программы моделирования.....	528
БАХУС А.В., КАЗИЕВА Т.В., РАБЕНАНДРАСАНА Ж., ТРОФИМОВ Н.С. Измерение квантовой эффективности детекторов одиночных фотонов на EMQOS 1.0.....	530
ПЕТРОВ Н.И. Фокусировка частично-когерентных вихревых пучков света в свободном пространстве.....	532
БРЕЦЬКО М.В., АКимова Я.Е., ВОЛЯР А.В., ХАЛИЛОВ С.И., ЕГОРОВ Ю.А., ИВАХНЕНКО А.О. Вихревые пучки Лагерра–Гаусса, устойчивые к простому астигматизму.....	534
САВЕЛЬЕВА А.А., КОЗЛОВА Е.С. Исследование процесса генерации оптических вихрей плазмонными линзами со спиралевидными отверстиями.....	536
ПЕТРОВ Н.И., СОКОЛОВ Ю.М., СТОЯКИН В.В., ДАНИЛОВ В.А., ПОПОВ В.В., УСИЕВИЧ Б.А. Наблюдение углового сдвига Гуса–Хенхен при плазмонном резонансе в субволновых дифракционных решётках.....	538
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н. Об аналитическом описании динамики световых пульс, распространяющихся в режиме туннельной ионизации.....	540
БОГДАНОВ А.А., ПАНИН С.В., ЕРЕМИН А.В., ЛЮБУТИН П.С., БЯКОВ А.В., ПАНИН К.С. Оптическая система для оценки деградации армированных полимерных композитов при циклическом нагружении.....	542
МУРАВЬЕВ И.А., СТРОГАНОВ Ю.В. База данных для задач линейной и нелинейной оптики.....	544
МЕЛЬНИКОВ А.Н. Усовершенствование машины для изготовления неклассических дифракционных решёток.....	546

ЦАРЕВА А.М., ШАКИРОВ Н.И., ЧЕМЕКОВА А.А., БЛАГОВА Е.В., МАКАЕВА Р.Х.	
Высокая информативность голографического метода при диагностике скрытых дефектов деталей машиностроения.....	548
ЛЕТОВА Е.Ю., ИВАНОВА Т.В., ЗАВГОРОДНИЙ Д.С..	
Разработка программы для программно-аппаратного комплекса контроля качества оптических систем по изображениям тест-объектов.....	550
ДЕНИСОВ Д.Г.	
Исследование динамического диапазона канала фоторегистрации макетного образца оптико-электронного прибора для высокоточного контроля параметров шероховатости субнанометрового уровня оптических деталей...	552
САЛАМАТИН Д.А.	
Стохастический параллельный градиентный алгоритм в задаче коррекции фазовых аберраций лазерного излучения биморфным адаптивным зеркалом.....	554
БУЛГАКОВ В.А., ТЕЛЕСШЕВСКИЙ В.И., СЕМЕНОВ А.П.	
Лазерный контроль отклонений формы крупногабаритных прецизионных изделий с дифракционной коррекцией волнового фронта.....	556
ШИПУНОВ Н.А., ОХРИМЕНКО А.А., АЛЕКСАНДРОВ А.С., КРЕТУШЕВ А.В.	
Анализ полупроводниковых поверхностей с помощью фазового микроскопа.....	558
КУДРЯВЦЕВ А.В., ТЕЛЕСШЕВСКИЙ В.И., СЕМЕНОВ А.П.	
Лазерный интерференционный контроль отклонений формы в среднем ИК-диапазоне.....	560
ПИКУЛЬ О.Ю., РУДОЙ К.А.	
Интерференция оптических волн в кристаллических кварцевых линзах.....	562
ГОЛУБЕВ А.В., ВДОВЕНКО А.Н.	
Разработка пластиковых держателей оптических элементов с позиционированием по X, Y, Z координатам и наклоном в двух перпендикулярных плоскостях.....	564
БУСУРИН В.И., КОРОБКОВ К.А., ЗО Л.Х., АУНГ Ч.Н.	
Исследование компенсационного преобразователя ускорений с оптическим считыванием и пьезоэлектрическим чувствительным элементом.....	566
ПАВЛОВ И.Н., РАСКОВСКАЯ И.Л., ШИТОВ С.А., ЯНИНА Г.М.	
Применение рекуррентного метода для исследования диффузионного слоя с помощью лазерной рефрактографии.....	568
УС Н.А., АВЕРШИН А.А., ДМИТРИЕВ В.К.	
Тепловая деформация оптических каналов моноблока лазерного гироскопа.....	570
АБРОСИМОВ И.Н., КУЗНЕЦОВ В.В.	
Применение результатов акустооптического взаимодействия с круговой симметрией пространственного распределения для модуляции излучения и оптимизации движения опор вращения.....	572

ШИПКО В.В. Методика выборочной спектральной регистрации контрастных изображений заданных объектов на основе перестраиваемых акустооптических фильтров.....	574
КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П., ТРОПИН А.Н. Отрезающие фильтры для среднего инфракрасного диапазона спектра.....	576
ДОЛГОПОЛОВ И.С., АФИНОГЕНОВА Е.Ю., СЮЙ А.В. Модификация оптического фильтра на основе рельефной структуры переменной глубины.....	578
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А. Информативный дневно-ночной монокуляр.....	580
ДЖАБР Я., ПАРФЕНОВ В.А., ТИШКИН В.О. 3D-визуализация подводного культурного наследия: краткий обзор литературы.....	582
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А. Псевдобинокулярный ночной бинокль с дневным каналом.....	584
РЫЖИКОВА Ю.В., РЫЖИКОВ С.Б. Диагностические средства исследования фракталоподобных объектов.....	586
ИБРАГИМОВА Э.И., ПАВЛОВ И.Н. Оценка эффективности средств защиты органов дыхания оптическим методом.....	588
ЕФРЕМЦЕВ В.Г., ЕФРЕМЦЕВ Н.Г., ТЕТЕРИН П.Е., ТЕТЕРИН Е.П., МОРОЗИХИН А.Н., БАЗАВЛУК Е.С. Диагностика рака лёгких на основе классификации компьютерных томограмм грудной клетки методами глубокого обучения.....	590
ЖИХОРЕВА А.А., БЕЛАШОВ А.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С. Применение методов фазовой визуализации для исследования оптических и морфологических параметров клеток в ходе фотодинамического воздействия.....	592
ЗОЛУТУХИНА А.А., МАЧИХИН А.С., ГУРЫЛЕВА А.В., ГРЕСИС В.О., ТЕДЕЕВА В.В. Определение пространственного распределения концентрации хлорофилла растений на основе обработки спектральных изображений.....	594
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., СЕМЕНОВА И.В., БЕЛЬТЮКОВ Я.М. Исследование эволюции продольных волн деформации в твердотельных волноводах с использованием цифровой голографии и спектрального анализа.....	596
НЕСТЕРОВ Н.А., КОСТЮК Г.К., ПЕТРОВ А.А., ШКУРАТОВА В.А. Изготовление и тестирование фазовых оптических элементов на исландском шпате для преобразования гауссова распределения интенсивности.....	598

АФАНАСЬЕВА О.Л., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., МИНИХАНОВ Т.З., СОЛОМАШЕНКО А.Б., ШИШОВА М.В.	
Исследование параметров дифракционных решёток с различным профилем рельефа для устройств дополненной реальности.....	600
МУСИХИНА Е.С., ИВАНОВ С.А.	
Создание волновода для систем дополненной реальности на фототерморефрактивном стекле.....	602
РАСТРЫГИН Д.С., ДОЛГИРЕВ В.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.	
Мультиплексированные голографические ФПМ дифракционные структуры с изменяющимся периодом.....	604
МАКАРЕВИЧ А.В., НАВНЫКО В.Н., ШАНДАРОВ С.М.	
Дифракционная эффективность смешанных голограмм в кристалле $Вi_{12}TiO_{20}$ произвольного среза.....	606
ДОЛГИРЕВ В.О., ШАРАНГОВИЧ С.Н.	
Преобразование поляризационных характеристик световых пучков электрически управляемыми МНГДС на основе КПЖК.....	608
АМАНОВА М.А., НАВНЫКО В.Н.	
Влияние оптической активности на дифракционную эффективность голограмм.....	610
АРХИПОВ А.В., ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., ИЛЮШИНА Д.А., МАУРЕР И.А.	
Атомно-силовая микроскопия для анализа рельефных голографических решёток на содержащих желатин светочувствительных фотоматериалах.....	612
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Особенности формирования голограмм периодических структур для реализации метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии.....	614
МОГИЛЬНЫЙ В.В., ХРАМЦОВ Э.А., ШКАДАРЕВИЧ А.П.	
Сенсибилизированная и собственная фоточувствительность полимера для записи рельефных голограмм.....	616
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А.	
Нестандартные методы обработки содержащих желатин фотоматериалов для голографии.....	618
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х.	
Оптимальный температурный режим записи голограмм в фототермических средах.....	620
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М.	
Анализ aberrаций оптической системы формирования голограмм периодических структур в некогерентном свете.....	623
МИНИХАНОВ Т.З., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Исследование влияния aberrаций оптической системы на процесс формирования изображений компьютерно-синтезированными голограммами.....	625

ХАРИТОНОВ Д.Ю., МУСЛИМОВ Э.Р.	
Программные инструменты для моделирования композитной голограммной призмы.....	627
ТЫНЬШОВА Т.Д., ИСМАНОВ Ю.Х.	
Эффект Тальбота для одномерной решётки в присутствии тонкой линзы.....	629
ЛАВРОВ А.П., ИВАНОВ С.И., ЗАБАЛУЕВА З.А.	
Спеклы при дифракции волны на транспаранте с массивом случайно расположенных малых отверстий.....	631
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., АЛЫМКУЛОВ С.А.	
Передаточная функция некогерентной оптической системы.....	633
БЕЛАШОВ А.В., ЖИХОРЕВА А.А., БЕГЛОВА Е.В., БЕЛЯЕВА Т.Н., САЛОВА А.В., ЛИТВИНОВ И.К., КОРНИЛОВА Е.С., СЕМЕНОВА И.В., ВАСЮТИНСКИЙ О.С.	
Калибровка и оптимизация низкокогерентной голографической микроскопии с использованием пространственно-временного модулятора света.....	635
ДЮБОВ А.С., КУЗЬМИН М.С., РОГОВ С.А.	
Экспериментальное исследование динамического диапазона оптического спектроанализатора с жидкокристаллической матрицей для ввода сигналов.....	637
КРАСНОВ В.В., РЫМОВ Д.А., ШИФРИНА А.В.	
Моделирование процесса оптического кодирования видеопотоков в схеме с использованием двух пространственно-временных модуляторов света.....	639
НИКИТИН Н.В., КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А., ЕВТИХИЕВ Н.Н.	
Оценка влияния шумов цифровых камер на качество реконструкции изображений в птихографии.....	641
ФАЗЛИЕВ Т.Ш., СТАРИКОВ Р.С.	
Дифракционные нейронные сети – обзор.....	643
КИРИЙ С.А., РЫМОВ Д.А., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Восстановление изображений с голограмм 2D-сцен с применением генеративно-состязательной нейросети.....	645
СВИСТУНОВ А.С., РЫМОВ Д.А., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С.	
Нейросетевая реконструкция изображений фазовых объектов с цифровых голограмм.....	647
КОЗЛОВ А.В., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Оценка локальных отклонений по шумам цифровой камеры для винеровской фильтрации в цифровой голографии.....	649
САВЧЕНКОВА Е.А., ЧЕРЁМХИН П.А.	
Анализ гистограммы сжатых цифровых голограмм при использовании различных методов квантования.....	651
ОВЧИННИКОВ А.С., КРАСНОВ В.В., ЧЕРЁМХИН П.А., РОДИН В.Г.	
Исследование методов бинаризации амплитудных осевых голограмм Френеля в расходящихся пучках.....	653
Именной указатель авторов.....	
	655

В.П. ДРАЧЕВ

Сколковский институт науки и технологий

ГИБРИДНЫЕ ПЛАЗМОН-КРЕМНИЕВЫЕ УСТРОЙСТВА В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ФОТОНИКЕ

Обсуждаются фотонные интегральные схемы на основе кремний-на-изоляторе с использованием плазмонных структур для будущих применений и текущий статус.

V.P. DRACHEV

Skolkovo Institute of Science and Technology

HYBRID PLASMON-SILICON DEVICES FOR INTEGRATED PHOTONICS

We discuss photonic integrated circuits based on silicon-on-insulator with plasmon structures for potential applications and status.

Ожидаемое объединение фотоники и электроники на единой платформе приведёт к прорывным изменениям в технологиях телекоммуникаций, центров обработки данных и высокопроизводительных вычислений. Среди перспективных применений кремниевой фотоники известны такие как оптотерагерцовый преобразователь/генератор и когерентное детектирование терагерцовых сигналов для беспроводной связи следующего поколения [1] и широкополосных аналого-цифровых преобразователей диапазона сверхвысоких частот [2].

Очевидным преимуществом технологии кремний-на-изоляторе (КНИ) является совместимость с существующими полупроводниковыми технологиями производства «комплементарных структур металл-окисел-полупроводник» (КМОП). Однако, попытки напрямую интегрировать фотонную функциональность в КМОП или биполярные кремниевые пластины без внесения каких-либо технологических изменений приводила к получению устройств с низкой производительностью и экономически неоправданны. Вместе с тем, кремний является подходящей материальной базой для создания фотонных устройств, также как и электронных. Благодаря высокому контрасту показателя преломления, основная мода для ТЕ-поляризации волновода имеет компактные размеры, 500×220 нм при длине волны 1550 нм и низких потерях, порядка 3 дБ/см.

Цель кремниевой фотоники – разработать фотонные схемы, где информация беспрепятственно передается из электронной области в оптическую и обратно. Перспективным направлением является гибридизация кремниевых волноводов с плазмонными структурами в направленный ответитель. Поверхностные плазмон-поляритоны (ППП) распространяются вдоль границ, разделяющих изотропные диэлектрики и металлические материалы. ППП образуют локализованные, зависящие от соотношения диэлектрических проницаемостей оптические отклики. Свойства локализации и чувствительность к концентрации электронов металла делают ППП интересным компонентом фотонных интегральных схем в части оптоэлектронного преобразования. Поведение направленного ответителя можно рассчитать с помощью теории связанных мод. Гибридная интегральная технология кремниевой фотоники и плазмоники позволяет изготавливать эффективные электрооптические устройства.

В докладе будут обсуждаться перспективные применения кремниевой фотоники и представлены работы Лаборатории Плазмоники Сколтеха [3 - 6] по разработке фотонных интегральных схем для оптоэлектронных компонент радиофотоники и нового поколения беспроводной связи.

Список литературы

1. Harter T., Muehlbrandt S., Ummethala S., Schmid A., Nellen S., Hahn L., Freude W., Koos C. Silicon-plasmonic integrated circuits for terahertz signal generation and coherent detection // Nature Photonics. 2018. V. 12. P. 625-633.
2. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2. С. 3-39.
3. Pshenichnyuk I.A., Nazarikov G.I., Kosolobov S.S., Maimistov A.I., Drachev V.P. Edge-plasmon assisted electro-optical modulator // Phys. Rev. B. 2019. V. 100(19). P. 195434.
4. Маймистов А.И., Пшеничнюк И.А., Косолюбов С.С., Драчев В.П. Цепочки связанных микрорезонаторов в интегральной оптике // Прикладная фотоника. 2020. Т. 7. № 2,
5. Zemtsov D.S., Zhigunov D.M., Kosolobov S.S., Zemtsova A.K., Puplauskis M., Pshenichnyuk I.A., Drachev V.P. Broadband silicon grating couplers with high efficiency and robust design // Optics Letters. 2022. V. 47. No. 13.
6. Косолюбов С.С., Пшеничнюк И.А., Жигунов Д.М., Земцов Д.С., Косолюбов В.С., Драчев В.П. Планарный электрооптический модулятор света на полевом эффекте возбуждения угловых плазмонов в гибридном волноводе. Патент РФ 2021125699/28(054303).

А.С. ЧЕРНИКОВ¹, Г.И. ЦЕЛИКОВ², М.Ю. ГУБИН^{1,2},
А.В. ШЕСТЕРИКОВ^{1,2}, К.С. ХОРЬКОВ¹, Г.А. ЕРМОЛАЕВ²,
И.С. КАЗАНЦЕВ², А.М. МАРКЕЕВ², Г.В. ТИХОНОВСКИЙ³,
Р.И. РОМАНОВ³, А.А. ПОПОВ³, О.О. КАПИТАНОВА⁴, А.В. СЮЙ²,
Д.А. КОЧУЕВ¹, А.Ю. ЛЕКСИН¹, Д.И. ЦЕЛИКОВ³, А.В. АРСЕНИН²,
А.В. КАБАШИН³, В.С. ВОЛКОВ², А.В. ПРОХОРОВ^{1,2}

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ ДИХАЛЬКОГЕНИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ И ФРАГМЕНТАЦИИ

Представлен инновационный подход к управлению резонансными свойствами наночастиц (НЧ) на основе объёмных дихалькогенидов переходных металлов, получаемых посредством лазерной абляции с последующей модификацией их химических и оптических свойств в процессе лазерной фрагментации. Получаемые НЧ обладают яркими экситонными, а также резонансами Ми в видимой области спектра, обладают рекордными значениями фототермического отклика, при этом совместимы с биообъектами.

A.S. CHERNIKOV¹, G.I. TSELIKOV², M.Yu. GUBIN^{1,2},
A.V. SHESTERIKOV^{1,2}, K.S. KHORKOV¹, G.A. ERMOLAEV²,
I.S. KAZANTSEV², A.M. MARKEEV², G.V. TIKHONOWSKI³,
R.I. ROMANOV³, A.A. POPOV³, O.O. KAPITANOVA⁴, A.V. SYUY²,
D.A. KOCHUEV¹, A.Yu. LEKSIN¹, D.I. TSELIKOV³, A.V. ARSENIN²,
A.V. KABASHIN³, V.S. VOLKOV², A.V. PROKHOROV^{1,2}

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

³National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

⁴Lomonosov Moscow State University

TUNABLE OPTICAL PROPERTIES OF TRANSITION METAL DICHALCOGENIDE NANOPARTICLES SYNTHESIZED BY LASER ABLATION AND FRAGMENTATION

Innovative approach for control of the resonance properties of nanoparticles (NPs) fabricated from bulk transition metal dichalcogenides obtained by laser ablation with subsequent modification of their chemical and optical properties during the process of laser fragmentation is presented. The obtained nanoparticles possess the bright exciton and Mie resonances in the visible region of the electromagnetic spectrum, the record values of photothermal response, and are compatible with biological objects.

В данной работе предлагается комбинированный метод лазерной абляции/фрагментации для синтеза MoS_2 наночастиц (НЧ) (рис. 1а). За счёт слабой связи между слоями в дихалькогенидах переходных металлов удается синтезировать НЧ идеальной сферической формы, а также получать оболочечные НЧ (рис. 1б). При этом высокий показатель преломления MoS_2 позволяет реализовать резонансы Ми в видимой области спектра для малых НЧ, определяющих оптические свойства растворов (рис. 1в). Ключевым моментом послужила разработка стратегии настройки оптических и фототермических свойств растворов, обусловленной превращением исходного MoS_2 в субоксид MoO_{3-x} при фрагментации (рис. 1г). Замечательной особенностью синтезированных MoO_{3-x} НЧ стало совмещение ими ярких экситонных, а также резонансов Ми в диапазоне 400 - 800 нм, наличие фототермического отклика, в 8 раз превышающего аналогичный для Si НЧ.

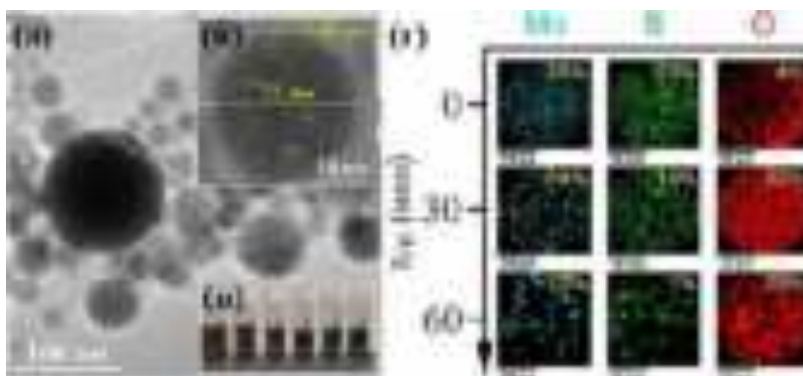


Рис. 1. ПЭМ-изображения MoS_2 НЧ после лазерной фрагментации в этаноле (а) и (б), коллоидные растворы при разном времени фрагментации (в); EDX-картирование химического состава НЧ в зависимости от времени фрагментации (г)

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (договор № 075-15-2022-1150), а также поддержана грантами РФФИ № 22-22-01020 и № 21-79-00206.

Д.А. ЗИМНЯКОВ^{1,2}, С.С. ВОЛЧКОВ¹

¹*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

**ИНДУЦИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
ВАРИАЦИИ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ
В АНСАМБЛЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ НАНОЧАСТИЦ
ВБЛИЗИ ПОРОГА ПРОТЕКАНИЯ: ВЛИЯНИЕ
МЕЖЧАСТИЧНОГО И ВНУТРИЧАСТИЧНОГО
ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА**

Представлены результаты исследований макроскопической проводимости слоёв плотноупакованных полупроводниковых наночастиц (TiO₂) при воздействии лазерного излучения вблизи края полосы фундаментального поглощения частиц. Предложена феноменологическая модель переноса основных и фотоиндуцированных носителей заряда в слоях вблизи порога протекания. Установлены особенности поведения флуктуационной составляющей фотопроводимости вблизи порога, обусловленные блокированием стохастических каналов проводимости в объёме слоёв в результате локализации носителей на ловушках в частицах.

D.A. ZIMNYAKOV^{1,2}, S.S. VOLCHKOV¹

¹*Yury Gagarin State Technical University of Saratov*

²*Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the RAS, Saratov*

**LASER-INDUCED VARIATIONS IN THE MACROSCOPIC
CONDUCTIVITY IN ENSEMBLES OF SEMICONDUCTOR
NANOPARTICLES NEAR THE PERCOLATION THRESHOLD:
EFFECT OF INTERPARTICLE AND INTRA-PARTICLE
CARRIER TRANSFER**

The results of studies of the macroscopic conductivity of layers of close-packed semiconductor nanoparticles (TiO₂) under laser irradiation near the edge of the fundamental absorption band of particles are presented. A phenomenological model for the transfer of majority and photoinduced charge carriers in layers near the percolation threshold is proposed. The features in the behavior of the fluctuation component of photoconductivity near the threshold, which are caused by the blocking of the stochastic conduction channels in the layers due to carriers localization on traps in the particles, are established.

Дисперсные системы на основе полупроводниковых наночастиц в настоящее время применяются для создания хеморезистивных сенсоров [1, 2]. Одним из возможных подходов к улучшению функциональных характеристик подобных сенсоров является увеличение концентрации свободных зарядов в объёме дисперсного чувствительного слоя в результате воздействия лазерного излучения в полосе фундаментального поглощения материала частиц [3]. Исследования влияния лазерного излучения на макроскопическую проводимость подобных дисперсных систем представляют не только прикладной интерес. В частности, они позволяют выявить фундаментальные особенности взаимосвязей между характеристиками локальных процессов внутрочастичного и межчастичного переноса основных и фотоиндуцированных зарядов и интегральной проводимостью систем вблизи порога протекания.

В работе представлены результаты исследований электрической проводимости слоёв плотноупакованных наночастиц TiO_2 (анатаза) в режиме протекания постоянного тока (от 0.5 до 2.0 нА) через слои при воздействии импульсно-периодического лазерного излучения с длиной волны от 355 до 480 нм и в отсутствие воздействия (темновой режим). Слои наночастиц (средний диаметр около 25 нм) формировались осаждением частиц из водных суспензий на кварцевые подложки с плоскими встречно-штыревыми электродными (Pt) системами. Разработана феноменологическая модель переноса основных и фотоиндуцированных носителей заряда в слоях на основе представлений о формировании и эволюции ансамблей независимых стохастических каналов проводимости (перколяционных кластеров) в объёме слоёв. Установлено, что вблизи порога протекания отклик проводимости слоёв на кратковременное импульсное воздействие лазерного излучения в полосе фундаментального поглощения обусловлен внутрочастичным переносом фотоиндуцированных носителей с их последующей локализацией на ловушках в объёме и на поверхности наночастиц.

В результате проведённых экспериментальных и теоретических исследований предложены новые подходы к лазерной диагностике электрофизических и оптических свойств частично проводящих дисперсных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-29-00612.

Список литературы

1. Espinosa E.H., Ionescu R., et al. // Sens. Actuators B Chem. 2007. V. 127. P. 137-142.
2. Liu X., Ma T., et al.// Adv. Funct. Mater. 2017. V. 27. P. 1702168.
3. Zimnyakov D., Vasilkov V., et al.// Nanomaterials. 2018. V. 8. P. 915.

С.М. ПОПОВ, О.В. БУТОВ¹, А.А. РЫБАЛТОВСКИЙ¹,
Д.В. РЯХОВСКИЙ, Д.С. ЛИПАТОВ², А.А. ФОТИАДИ³,
Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

¹*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва*

²*Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Десятых РАН, Нижний Новгород*

³*Ульяновский государственный университет*

СЛУЧАЙНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ ЛАЗЕРЫ С РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ ИТТЕРБИЕВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С МАССИВОМ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК

В работе представлены последние результаты по созданию «случайных» волоконных лазеров с резонатором на основе иттербиевого оптического волокна (ОВ) с массивом волоконных брэгговских решёток (ВБР) записанных в процессе вытяжки ОВ. Получена лазерная генерация с максимальной эффективностью 33 % на длинах волн 976 и 1060 нм при накачке на длине волны 907 нм.

S.M. POPOV, O.V. BUTOV¹, A.A. RYBALTOVSKIY¹,
D.V. RYAKHOVSKIY, D.S. LIPATOV², A.A. FOTIADI³,
Yu.K. CHAMOROVSKIY

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

¹*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Moscow*

²*Devyatikh Institute of Chemistry of High-Purity Substances of the RAS, Nizhny Novgorod*

³*Ulyanovsk State University*

RANDOM FIBER LASERS WITH A CAVITY BASED ON YTTERBIUM DOPED OPTICAL FIBERS WITH ARRAYS OF FIBER BRAGG GRATINGS

The paper presents the results on the creation of «random» fiber lasers with cavity based on ytterbium doped optical fiber with an array of fiber Bragg gratings inscribed during the OF's drawing process. Lasing with a maximum efficiency of 33 % was obtained at wavelengths of 976 and 1060 nm with pumping at a wavelength of 907 nm.

Достаточно новым направлением исследований являются т.н. «случайные» волоконные лазеры. В таких лазерах обратная связь достигается за счёт рассеяния Рэлея, а усиление за счёт эффектов рассеяния Рамана [1] или ВРМБ [2]. Ранее была получена одночастотная лазерная генерация на длине волны 1547,6 нм в ОВ легированным ионами

эриция с резонатором из массива ВБР состоящим из 500 отражателей (общая длина резонатора 5 м) [3]. Запись массива выполняется во время вытяжки ОВ с помощью эксимерного УФ-лазера работающего на длине волны 248 нм. В данной работе пойдёт речь об экспериментах по созданию «случайных» иттербиевых лазеров работающих на длинах волн 1060 [4] и 976 нм [5]. Для создания резонаторов на длины волн 1060 и 976 нм использовались фазовые маски с периодом 729,5 и 671,2 нм, а длины резонаторов имели величину 20 и 6 м, соответственно. Плотность записи массивов ВБР – 100 %, то есть массив ВБР полностью покрывает образцы ОВ (1 м = 100 ВБР). Для получения лазерной генерации использовалась так называемая схема «встречной» накачки на $\lambda = 907$ нм.

На рис. 1 показана частотная (OFDR) рефлектограмма образца ОВ с ВБР. Превышение сигнала над уровнем Рэля – 50 дБ на длине волны 1548 нм. Линейная (slope) эффективность лазерной генерации на длинах волн 976 и 1060 нм достигает величины 33 % (рис. 2). Полученная лазерная генерация для обоих случаев – узкополосная и непрерывная, что объясняется формированием динамических решёток [3].

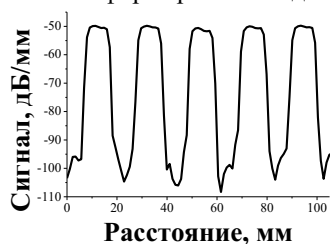


Рис. 1. OFDR рефлектограмма массива ВБР в иттербиевом ОВ ($\lambda = 1548$ нм, период маски 1070 нм) – плотность 50 %

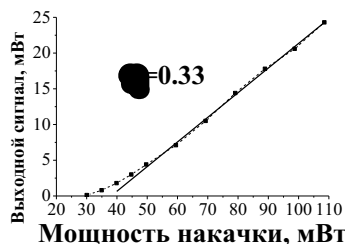


Рис. 2. Выходная мощность «случайной» лазерной генерации на 976 нм от накачки на 907 нм

Данные лазерные источники излучения интересны для применения в биомедицине, микрохирургии и в лазерных системах большой мощности.

Работа выполнена в рамках государственного задания. Работа Д.С. Липатова поддержана РНФ (проект № 22-19-00511). Работа А.А. Фотиади поддержана Министерством науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-581).

Список литературы

1. Turitsyn S.K., Babin S.A., et al. // Nature Photonics. 2010. V. 9. P. 231.
2. Fotiadi A.A. // Nature Photonics. 2010. V. 4. P. 204.
3. Popov S.M., Butov O.V., et al. // Results in Physics. 2020. V. 16. P. 102868.
4. Rybaltovsky A.A., Popov S.M., et al. // Fibers. 2021. V. 9 (9). P. 53.
5. Rybaltovsky A.A., Popov S.M., et al. // Photonics. 2022. V. 9. P. 840.

Е.П. ПОЖИДАЕВ, С.П. КОТОВА¹, С.А. САМАГИН¹,
В.А. БАРБАШОВ

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

¹Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ КАК ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ СРЕДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ВИХРЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПОЛЕЙ

Впервые создана электроуправляемая секторная спиральная фазовая пластинка на основе геликоидальной наноструктуры жидкокристаллического сегнетоэлектрика, работающая как электрооптическая среда пространственно-временного модулятора света, обеспечивающего формирование и реконфигурацию аксиально-симметричных вихревых световых полей с частотой до 3 кГц, что на два порядка больше, чем у известных жидкокристаллических пространственно-временных фазовых модуляторов света, используемых в современных световых фазовых матрицах и в квантовых пинцетах.

E.P. POZHIDAEV, S.P. KOTOVA¹, S.A. SAMAGIN¹, V.A. BARBASHOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Samara Branch of Lebedev Physical Institute of the RAS

FERROELECTRIC LIQUID CRYSTALS AS THE ELECTROOPTICAL MEDIA OF HIGH-FREQUENCY VORTEX LIGHT FIELDS GENERATORS

For the first time, an electrically controlled sectoral spiral phase plate based on a helical nanostructure of a ferroelectric liquid crystal has been created, which operates as an electro-optical medium of a space-time light modulators that provides the formation and reconfiguration of axially symmetric vortex light fields with a frequency of up to 3 kHz, which is two order of magnitude greater than that of the known liquid-crystal space-time light modulators used in modern light phase matrices and in quantum tweezers.

В геликоидальных жидкокристаллических сегнетоэлектриках (ЖКС) с субволновым шагом $p_0 \ll \lambda$ (λ – длина волны света) наблюдается электрооптический эффект деформированного электрическим полем геликоида, известный как deformed helix ferroelectric (DHF) эффект [1, 2]. Этот эффект позволяет осуществлять непрерывную и безгистерезисную электроуправляемую модуляцию фазового сдвига $\Delta\Phi$ электромагнитной волны, проходящей сквозь слой ЖКС. Время изменения под действием

электрического поля фазового сдвига лазерного излучения в интервале значений $0 \leq \Delta\Phi \leq 2\pi$ в DHF-эффекте порядка 10^{-4} с, и не зависит от толщины слоя ЖКС, в отличие от коммерчески доступных пространственно-временных фазовых модуляторов света на основе нематических жидких кристаллов (НЖК) с типичным значением времени отклика около 10^{-4} с. Упомянутое преимущество ЖКС перед НЖК позволило создать оптоэлектронный генератор, обеспечивающий в режиме электроуправляемой секторной спиральной фазовой пластинки формирование и реконфигурацию аксиально-симметричных вихревых световых полей с частотой до 3 кГц. Блок-схема прибора и иллюстрация его работы приведены на рис. 1.

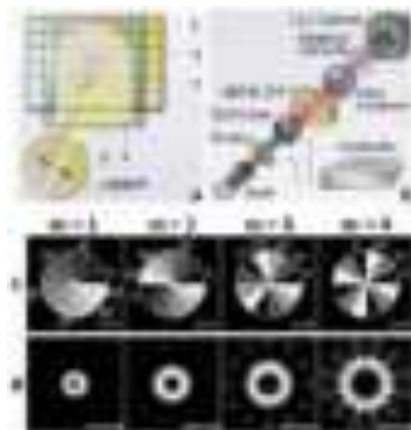


Рис. 1. Круговая секторная спиральная фазовая пластинка (ССФП) на основе геликоидальной наноструктуры ЖКС: 1 и 2 – стеклянные подложки, покрытые полупроводниковыми прозрачными электродами ИТО, разделёнными на двенадцать независимо управляемых изолированных секторов на одной подложке – 3 или сплошными на другой, противоположной – 4, 50 мкм слейсеры, задающие толщину слоя ЖКС – 5 (a); блок-схема оптоэлектронного прибора (b); контроллер подаёт на сектора ССФП напряжения, обеспечивающие расчётное распределение фазовых сдвигов света (как на рис. 1c); шкала серого ступенчатых распределений фазового сдвига (в градусах), необходимых для формирования вихревых световых полей с топологическими зарядами $m = 1, 2, 3, 4$ (c); формируемые оптоэлектронной схемой аксиально-симметричные вихревые световые поля ($\lambda = 632,8$ нм), длина полоски для оценки размера вихревых световых полей – 1 мм (d)

Список литературы

1. Beresnev L.A., et al. // *Liq. Cryst.* 1989. V. 5. P. 1171.
2. Pozhidaev E.P., et al. // *J. Mol. Liq.* 2022. V. 397 (12). P. 120493.

В.Н. БЕЛЫЙ, Н.А. ХИЛО, П.И. РОПОТ, Н.С. КАЗАК¹

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси, Минск

СУПЕРПОЗИЦИИ БЕССЕЛЕВЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Предложено использовать суперпозиции бесселевых световых пучков высших порядков для передачи информации в свободном пространстве. Рассмотрен пример оптической системы передачи, включающей генератор бесселевых пучков и их суперпозиций, электрооптический модулятор для переключения пространственных мод, а также излучатель и приёмник.

V.N. BELYI, N.A. KHILO, P.I. ROPOT, N.S. KAZAK¹

B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk

¹SSPA "Optics, Optoelectronics and Laser Technology" of the NAS of Belarus, Minsk

SUPERPOSITIONS OF BESSEL LIGHT BEAMS FOR OPTICAL COMMUNICATION IN FREE SPACE

The superpositions of higher-order Bessel light beams are proposed for the transmission of information in free space. An example of an optical transmission system including a generator of Bessel beams and their superpositions, electro-optical modulator for switching spatial modes as well as a transmitter and a receiver are considered.

В настоящее время наиболее перспективный подход к реализации оптической связи в свободном пространстве основан на использовании световых пучков с винтовыми фазовыми дислокациями (вortexами), обладающими орбитальным угловым моментом. Это вызвано повышенной устойчивостью данных дислокаций к шумовым факторам, возникающим при распространении в атмосфере. Наибольший успех в этом направлении достигнут в работах австрийской школы (А. Zeilinger, М. Krenn и др.). Так в [1] для передачи изображений в сильно турбулентной атмосфере предложено использовать 16 суперпозиций лаггер-гауссовых (ЛГ) пучков с противоположными орбитальными угловыми моментами, что позволило передать на расстояние три километра изображения с 16-уровневой шкалой серого цвета. Исследования показали также повышенную устойчивость вихревых ЛГ

пучков к деградации в атмосфере. В [2] была осуществлена передача информации на расстояние 143 км в свободном пространстве. Здесь использовались ЛГ пучки порядков $m = \pm 1, \pm 2$ и ± 3 , а переключение кодовых символов осуществлялось пространственным модулятором света.

Предлагаемый нами метод кодирования и передачи информации предполагает использование вихревых бесселевых световых пучков (БСП), а также их суперпозиций, обладающих такими достоинствами, как подавленная дифракционная расходимость и способность восстановления поперечной структуры за препятствиями.

Для получения вихревых БСП используются одноосный и (или) двuosный кристаллы [3 - 6] в схеме, в которой входной гауссов пучок коллимируется и затем преобразуется аксиконом в БСП нулевого порядка с эффективностью близкой к единице. В зависимости от поляризации падающего пучка, которая управляется электрооптическим модулятором, на выходе можно получить необходимые вихревые БСП или их суперпозиции, показанные на рис. 1. Перед выходом в свободное пространство, пучки увеличиваются телескопом. Для декодирования изображений можно использовать, например, оптические корреляторы, а также обучающиеся нейронные сети.

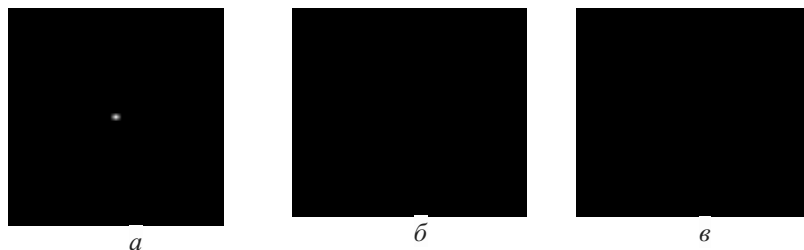


Рис. 1. Примеры суперпозиций двух БСП с $m = 1$ и $m = -1$ и относительной разностью фаз 0° (а), 30° (б) и 90° (в)

Список литературы

1. Krenn M., et al. // *New Journal of Physics*. 2014. V. 16. P. 113028.
2. Krenn M., Handsteiner J., et al. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA (PNAS)*. 2016. V. 113 (48). P. 13648.
3. Belyi V.N., Khilo N.A., Kurilkina S.N., Kazak N.S. // *J. Opt.* 2013. V. 15. P. 044018.
4. Belyi V.N., Khilo N.A., Kazak N.S., Ryzhevich A.A., Forbes A. // *Optical Engineering*. 2011. V. 50 (5). P. 059001.
5. Belyi V.N., Kazak N.S., Kurilkina S.N., Khilo N.A. // *Opt. Commun.* 2009. V. 282. P. 1998-2008.
6. Vasilyev R., Dudley A., Khilo N., Forbes A. // *Optics Express*. 2009. V. 17. P. 3389-23395.

Е.А. БЕЗУС^{1,2}, Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ^{1,2}, Р.В. СКИДАНОВ^{1,2},
В.А. БЛАНК^{1,2}, С.В. ГАНЧЕВСКАЯ^{1,2}, В.В. ПОДЛИПНОВ^{1,2},
Д.А. БЫКОВ^{1,2}, Н.В. ГОЛОВАСТИКОВ^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара
²Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева

РАСЧЁТ И ИССЛЕДОВАНИЕ «СПЕКТРАЛЬНЫХ» ДИФРАКЦИОННЫХ ЛИНЗ, ФОКУСИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ДЛИН ВОЛН В РАЗЛИЧНЫЕ ТОЧКИ

Предложен метод расчёта «спектральных» дифракционных линз, осуществляющих разделение и фокусировку нескольких рабочих длин волн в нескольких точках. Результаты численного моделирования рассчитанных линз подтверждают высокую эффективность метода. Результаты моделирования подтверждаются результатами экспериментальных исследований, включающих изготовление «спектральных» линз методом прямой лазерной записи и их исследование в оптическом эксперименте.

E.A. BEZUS^{1,2}, L.L. DOSKOLOVICH^{1,2}, R.V. SKIDANOV^{1,2},
V.A. BLANK^{1,2}, S.V. GANCHEVSKAYA^{1,2}, V.V. PODLIPNOV^{1,2},
D.A. BYKOV^{1,2}, N.V. GOLOVASTIKOV^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara
²Samara National Research University

DESIGN AND INVESTIGATION OF «SPECTRAL» DIFFRACTIVE LENSES FOCUSING RADIATION OF DIFFERENT WAVELENGTHS TO DIFFERENT POINTS

A method is proposed for designing “spectral” diffractive lenses separating and focusing several operating wavelengths to several points. The numerical simulation results of the designed lenses confirm high efficiency of the proposed method. The numerical results are confirmed by the results of experimental studies including the fabrication of “spectral” lenses by direct laser writing and their investigation in an optical experiment.

Дифракционные линзы (ДЛ), имеющие толщину микрорельефа, сравнимую с длиной волны падающего излучения, представляют интерес для создания компактных оптических систем. Однако ДЛ обычно предназначены для работы на одной длине волны и поэтому имеют значительно большие хроматические аберрации по сравнению с рефракционными линзами. Методы расчёта ДЛ, работающих с излучением нескольких различных длин волн, вызывают в настоящее время большой интерес исследователей [1 - 3].

В настоящей работе предложен метод расчёта ДЛ, предназначенных для разделения и фокусировки излучения L длин волн в L точек, расположенных в некоторой плоскости, перпендикулярной оптической оси. Метод основан на минимизации целевой функции, характеризующей отклонение комплексных функций пропускания линзы от комплексных функций пропускания «обычных» ДЛ, фокусирующих расчётные длины волн в заданные точки. Расчёт линзы сводится к набору независимых задач поточечной оптимизации, каждая из которых описывает расчёт микрорельефа в одной точке. Результаты моделирования ряда рассчитанных «спектральных» ДЛ в рамках скалярной теории дифракции, а также экспериментальные результаты подтверждают высокую эффективность предложенного метода. На рис. 1 показана изготовленная «спектральная» ДЛ, предназначенная для фокусировки длин волн 455 и 750 нм в две различные точки. Измеренные двумерные распределения интенсивности, сформированные изготовленной ДЛ, показаны на рис. 2.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание Самарскому университету (лаборатория «Фотоника для умного дома и умного города», проект FSSS-2021-0016)).



Рис. 1. Изготовленная «спектральная» ДЛ



Рис. 2. Измеренные распределения интенсивности, сформированные ДЛ

Список литературы

1. Banerji S., Meem M., et. al. // Optica. 2019. V. 6. P. 805-810.
2. Doskolovich L.L., Skidanov R.V., et. al. // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 11705-11720.
3. Meem M., Majumder A., et. al. // Opt. Express. 2021. V. 29. P. 20715-20723.

А.Н. ПУТИЛИН¹, С.Е. ДУБЫНИН^{1,2}, Н.А. ПУТИЛИН^{1,3},
С.С. КОПЁНКИН^{1,4}, Ю.П. БОРОДИН^{1,4}

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, Москва

²Исследовательский центр Самсунг, Москва

³Московский государственный университет геодезии и картографии «МИИГАиК»

⁴МИРЭА – Российский технологический университет

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ВОЛНОВОДНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ В СХЕМАХ ДИСПЛЕЕВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

В данной работе представлено исследование мультипликации лучей на волноводных голографических решётках. Проводилось сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования наложенных и одиночных голографических решёток. Исследована работа голографических решёток с малым периодом ($\approx 340 \div 350$ нм).

A.N. PUTILIN¹, S.Ye. DUBYNIN^{1,2}, N.A. PUTILIN^{1,3},
S.S. KOPENKIN^{1,4}, Yu.P. BORODIN^{1,4}

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²Samsung R&D Institute Russia, Moscow

⁴Moscow State University of Geodesy and Cartography «MIIGAiK»

⁴MIREA – Russian Technological University

APPLICATION OF WAVEGUIDE HOLOGRAPHIC MULTIPLEXERS IN AUGMENTED REALITY DISPLAY

This paper presents a study of ray multiplication with waveguide holograms. The superimposed gratings and the single gratings has been investigated. The experimental results were compared with the simulation results. The holographic gratings with small diffraction periods ($\approx 340 \div 350$ nm) were analyzed.

Одним из ключевых элементов оптических схем дисплеев дополненной (AR) и смешанной (MR) реальности являются оптические элементы совмещения реального и виртуального изображения – бим-комбайнеры (beam-combiners – BC). Наибольшее распространение получили волноводные голографические бим-комбайнеры [1]. Наложённые решётки позволяют обеспечить мультипликацию зрачка по двум направлениям. При исследовании их работы было обнаружено, что помимо дифракции на записанных решётках периода d возникает

дифракция на возникших при записи «мнимых» решётках с меньшим периодом дифракционной картины ($\sqrt{2}/2$) d для наложенных под 90° решёток). Построенные с учётом этого модели дали хорошее совпадение с экспериментальными результатами (рис. 1). Дифракция на «мнимых» решётках проявляется, в первую очередь, при малых значений периодов ($d = 340 \div 350$ нм). Однако мультипликация по двум направлениям может быть получена и без использования наложенных решёток при «косом» вводе излучения (рис. 2) [2]. Было установлено, что при таком способе ввода присутствуют вторые порядки дифракции, что предъявляет соответствующие требования к рельефу голографической решётки.

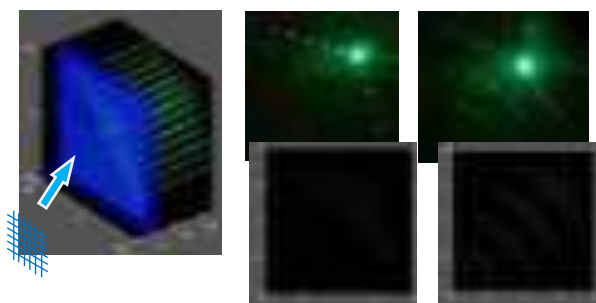


Рис. 1. Мультипликация лучей на наложенных волноводных голограммах: схема воспроизведения (слева), угол падения $\alpha = 20^\circ$ (в центре), угол падения $\alpha = 35^\circ$ (справа)

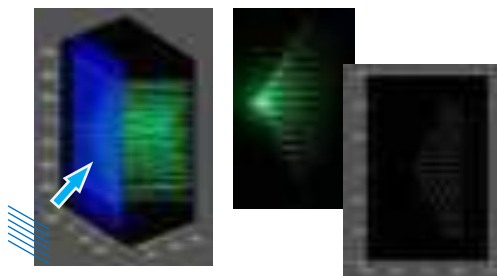


Рис. 2. Мультипликация лучей на волноводной голограмме при косом падении: схема воспроизведения (слева), воспроизведение под углом $\alpha = 35^\circ$ (справа)

Список литературы

1. Kress B.C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations // Proc. SPIE. 2019. V. 11062. P. 110620J.
2. Путилин А.Н. и др. Исследование двухлучевого режима ввода излучения в планарный волновод // ЖТФ. 1986. Т. 56. № 7. С. 1406-1407.

Н.А. ИВАНОВА, Д.С. КЛЮЕВ
Тюменский государственный университет

ЖИДКОСТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С УПРАВЛЯЕМОЙ ФОРМОЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Представлен обзор методов создания элементов оптики на основе микрокапель и тонких плёнок жидкости с динамически изменяемой кривизной границы раздела фаз, выполняющей функции оптической поверхности. Принцип управления кривизной основан на генерации сдвиговых напряжений на границе раздела с помощью теплового воздействия оптического пучка. Показаны жидкие микролинзы с обратимо перестраиваемыми фокусным расстоянием и апертурой входного отверстия за счёт изменения интенсивности излучения. Форма такой микролинзы может непрерывно изменяться от плосковыпуклой, плосковогнутой до тороидальной, а также принимать форму с несколькими фокусами. Разработаны жидкостные двухслойные диафрагмы, позволяющие полностью перекрывать световой поток. Особенным свойством разработанных элементов является способность самоустраиваться в максимум интенсивности пучка и отслеживать его пространственное положение. Разработанные нами оптические элементы могут стать альтернативой твердотельной оптике свободной формы.

N.A. IVANOVA, D.S. KLYUEV
Tyumen State University

LIQUID OPTICAL ELEMENTS WITH CONTROLLED FREE SURFACE SHAPE

A review of methods for creating optical elements based on microdroplets and thin liquid films with a dynamically controlling the interfacial curvature, which acts as an optical surface, is presented. The principle of curvature control is based on the generation of shear stresses at the interface using the heating with an optical beam. Liquid microlenses with reversibly tunable focal length and aperture by varying the light intensity are shown. The shape of such microlenses is continuously changed from plano-convex to plano-concave to toroidal shape, and also take on a shape with several foci. Two-layer liquid diaphragms were developed that allowing for completely blocking the light flux. A feature of the optical elements is the ability to self-align to the maximum beam intensity and track its spatial position. The optical elements developed by us can become an alternative to free-form solid-state optics.

Современные камеры машинного зрения, диагностическое и оптическое оборудование требуют создания миниатюрных, легко интегрируемых элементов оптики с высокой степенью адаптации

оптических характеристик. Одним из решений является использование границы раздела жидких сред [1 - 3] в качестве идеально гладких оптических поверхностей с легко перестраиваемой формой под действием внешних сил и способностью выполнять любое количество циклов без износа и потери оптических характеристик. В работе показаны жидкостные микролинзы с управляемой кривизной поверхности и апертурой за счёт лазерно-индуцированных капиллярных течений. На рис. 1 линза формируется из плоского слоя водного раствора при увеличении мощности (P) лазера, F меняется от бесконечности до нескольких мм [4]. На рис. 2 линзой служит сидячая капля этиленгликоля, вариация F происходит в режиме собирающей и рассеивающей линзы при повышении P лазера [5]. Использование микрокапли ПАВ позволило создать тороидальную линзу с переходом к поверхности сложной формы при высоких P управляющего лазера. Данный подход может стать основой для создания жидкостной оптики свободной формы, оптических датчиков и биомиметических систем зрения.

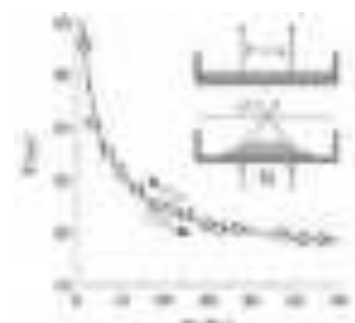


Рис. 1. Адаптивная микролинза (водный раствор этиленгликоля) на основе концентрационно-капиллярного эффекта

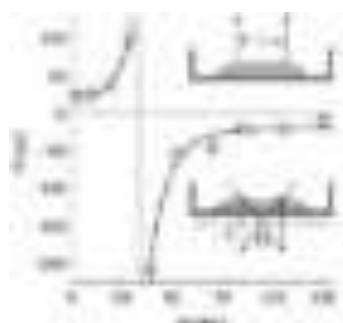


Рис. 2. Варифокальная капля-линза (этиленгликоль) на основе термокапиллярного эффекта

Работа выполнена при поддержке программы развития университета «Приоритет 2030» проект №122112500011-0 «Природовдохновлённые оптические технологии».

Список литературы

1. Wu Q., Zhang H., Jia D., Liu T. // *Molecules*. 2022. V. 27. No. 8025.
2. Mishra K., van den Ende D., Mugele F. // *Micromachines*. 2016. V. 7. No. 102.
3. Ivanova N.A. // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2020. V. 378. No. 20190442.
4. Malyuk A.Yu., Ivanova N.A. // *Optics Communications*. 2017. V. 392. P. 123-127.
5. Malyuk A.Yu., Ivanova N.A. // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112. No. 103701.

М.Х. ЭГАМОВ, Б.И. МАХСУДОВ¹

*Худжандский научный центр Национальной академии наук Таджикистана
¹Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан*

ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Исследованы механизмы ориентационного упорядочения микроскопических капель нематического жидкого кристалла с тангенциальными и нормальными граничными условиями в одноосно вытянутых полимерных плёнках. Установлен пороговый характер ориентации молекул жидкого кристалла, обусловленной особенностями анизотропного взаимодействия нематика с надмолекулярной структурой полимерной матрицы.

M. Kh. EGAMOV, B. I. MAKHSUDOV¹

*Khujand Scientific Center of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan
¹Tajik National University, Dushanbe, Tajikistan*

ORIENTATION EFFECT IN POLYMERIC LIQUID CRYSTAL DISPERSED SYSTEMS

Mechanics of orientational ordering of microscopic droplets of nematic liquid crystal with normal and tangential boundary conditions in polymeric matrix, stretched along single axis, are researched. It is established that liquid crystal molecules orientation has threshold pattern, which is caused by specific features of interaction of the nematic with super molecular structure of polymeric matrix.

Изучение пороговых эффектов в жидких кристаллах (ЖК) вызывает значительный интерес для исследователей физики конденсированного состояния, т.к. эти мезофазные анизотропные среда относятся к мягким системам, существующим при комнатных температурах. Поэтому в данной работе исследовали механизмы пороговой переориентации директора n , проявляющие пространственно-периодические структуры в тонких плёнках планарно-ориентированных нематических жидких кристаллах (НЖК). Это обусловлено тем, что пороговые эффекты широко используются в качестве одного из многочисленных методов исследования вещества [1]. Интерес к физике процессов в ячейках ЖК во внешних электрических и магнитных полях и, в частности, к эффектам, связанным с пороговыми явлениями в НЖК, связан, прежде всего, с

широким применением этих ячеек в электрооптических устройствах, системах отображения информации [2].

Особенности деформации структуры нематика при действии механического поля в линейном и нелинейном режимах определяют оптические свойства жидкокристаллической ячейки, содержащей слой НЖК с исходной гомеотропной ориентацией материала, помещённый между двумя скрещёнными поляризаторами. В исходном состоянии с недеформированной структурой кристалла ячейка непрозрачна по отношению к световому потоку, падающему на неё нормально. Отклонение молекул нематика от нормали при внешнем воздействии приводит к изменению разности фаз в обыкновенной и необыкновенной световых волнах в кристалле, и, как результат, к изменению оптической прозрачности ячейки. При неоднородной по толщине слоя ориентации молекул и малых углях θ прозрачность $m(t)$ приводится к виду:

$$m(t) = \frac{I(t)}{I_0} = \frac{1}{2} \cdot \sin^2 \left\{ \frac{\Delta n}{2} k h \int_0^1 \theta^2(x, z) dz \right\} \sin^2(2\varphi),$$

где $\Delta n = n_{||} - n_{\perp}$ – оптическая анизотропия; $n_{||}$ и n_{\perp} – показатели преломления вдоль и ортогонально оси кристалла; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в световой волне с длиной волны λ ; φ – угол между направлением сдвига и ориентацией одного из поляризаторов.

Возможность регистрации деформации структуры НЖК на основе изменения оптической прозрачности определили формулой, указанной в [1, 2]. Приведённые расчёты определили свойства жидкокристаллической ячейки при воздействии на неё одноосной деформации. Показано, что эллиптичность в движении граничной пластин может существенно менять картину деформации структуры НЖК и оптические свойства жидкокристаллической ячейки по отношению к исходному структуре. Доказано, что роль эллиптичности возрастает с увеличением степени деформации.

Список литературы

1. Махсудов Б.И., Файзуллоев И.Х., Эгамов М.Х. Оптический гистерезис в композитах на основе полимер-нематический жидкий кристалл при одноосной деформации // Известия ВУЗов. Серия Физика. 2022. Т. 65. № 3. С. 88-91.
2. Barbero L.G. Adsorption phenomena and anchoring energy in nematic liquid crystals. CRC Press. 2006.

К.Г. КОМЯК, О.С. КАБАНОВА, И.И. РУШНОВА,
Е.А. МЕЛЬНИКОВА, А.Л. ТОЛСТИК
Белорусский государственный университет, Минск

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО СТРУКТУРИРОВАННЫХ АНИЗОТРОПНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Отработан метод формирования анизотропных дифракционных структур на основе текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла. Созданы дифракционные элементы с чередование доменов, отличающихся ориентациями директора жидкого кристалла. Продемонстрирована возможность электрического управления распределением интенсивности по различным порядкам дифракции.

K.G. KAMIYAK, O.S. KABANOVA, I.I. RUSHNOVA,
E.A. MELNIKOVA, A.L. TOLSTIK
Belarusian State University, Minsk

FORMATION OF SPATIALLY STRUCTURED ANISOTROPIC DIFFRACTION ELEMENTS

A method for the formation of anisotropic diffraction structures based on the textured photoalignment of nematic liquid crystal has been developed. Diffraction elements with alternating domains with different orientations of the liquid crystal director were created. The possibility of electrical control of intensity distribution over different orders of diffraction is demonstrated.

В настоящее время высок интерес к жидким кристаллам (ЖК) как к перспективным электрооптическим материалам. Создание на их основе дифракционных элементов, формирующих световое поле с заданными характеристиками, является интенсивно развивающимся направлением в оптике. Существует несколько способов задания необходимой ориентации молекул ЖК на подложках плоскопараллельной ячейки: механическое натирание, использование электродов специальной конфигурации, голографический метод. Новым способом формирования ориентации молекул ЖК, продемонстрировавшим большие успехи в последнее время, является метод текстурированной фотоориентации, главное его преимущество – бесконтактность [1 - 3].

В настоящей работе оптимизирован метод текстурированной фотоориентации нематического жидкого кристалла (НЖК) применительно к созданию дифракционных структур на основе с использованием нескольких стадий процесса облучения азокрасителя Ata-2 [1 - 4]. На первой стадии задавалась первоначальная ориентация молекул азокрасителя по всему слою. Последующая засветка фоточувствительного слоя через амплитудный транспарант излучением, поляризованным в другом направлении, позволяет создавать структуры с различными ориентациями молекул азокрасителя. На основе предложенной технологии созданы дифракционные ЖК-элементы с чередование доменов, отличающихся ориентациями директора НЖК.

На рис. 1 представлена картина дифракции излучения на изготовленной ЖК-ячейке при различных значениях напряжения, поданного на ячейку. Видно, что под действием внешнего электрического поля происходит переориентация директора ЖК в объеме среды, приводящая к перераспределению интенсивности излучения в различных порядках дифракции.



Рис. 1. Картина дифракции излучения на ЖК-ячейке при разном напряжении

Список литературы

1. Кабанова О.С., Рушнова И.И., Мельникова Е.А., Толстик А.Л., Муравский Ал.А., Муравский Ан.А., Хайнцманн Р. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2019. № 3. С.4-11.
2. Kamiak K.G., Kabanova O.S., Rushnova I.I., Melnikova E.A., Tolstik A.L. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. P. 1496-1500.
3. Kamiak K.G., Kabanova O.S., Rushnova I.I., Melnikova E.A., Tolstik A.L. // Book of Abstracts XXI International Conference Foundations & Advances in Nonlinear Science. Minsk, 2022. P. 35-36.
4. Rushnova I.I., Kabanova O.S., Melnikova E.A., Tolstik A.L. // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2018. V. 21 (3). P. 206-219.

Д.Г. ДЕНИСОВ, В.Е. КАРАСИК, А.А. ПАТРИКЕЕВА
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ОСНОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
МЕТОДА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ
ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ
ВЫСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ
ШЕРОХОВАТОСТИ СУБНАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ**

Рассмотрен модернизированный метод дифференциального рассеяния, основанный на приближениях малых возмущений амплитуд отражённой электромагнитно-волны в оптическом спектральном диапазоне от поверхности фазового экрана. Проанализировано влияние внешних факторов на погрешность измерения среднеквадратического отклонения при регистрации индикатрисы рассеянного лазерного излучения.

D.G. DENISOV, V.E. KARASSIK, A.A. PATRIKEEVA
Bauman Moscow State Technical University

**DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC FOUNDATIONS
AND MODELING OF THE METHOD OF DIFFERENTIAL
SCATTERING OF LASER RADIATION FOR THE TASK
OF HIGH-PRECISION CONTROL OF THE ROUGHNESS
PARAMETERS OF THE SUBNANOMETER LEVEL**

A modernized differential scattering method based on approximations of small perturbations of the amplitudes of the reflected electromagnetic wave in the optical spectral range from the surface of the phase screen is considered. The influence of external factors on the measurement error of the standard deviation during registration of the scattered laser radiation indicatrix is analyzed.

Для достижение высоких технологических показателей качества различных оптических деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики. Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии глубокой полировки, когда высотные статистические параметры профилей достигают нано- и субнанометровых уровней. Для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового

уровня на сегодняшний день применяются различные классы оптико-электронных приборов и систем.

В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на [1, 2]: методы полного интегрального рассеяния (TIS – Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF – Bidirectional Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS – Angle-Resolved Scattering). Анализ влияния ограничительных факторов в методе дифференциального рассеяния позволяет определить его систематическую погрешность повысив точность измерения. Для полученного выражения индикатрисы было проведено математическое моделирование процесса рассеяния лазерного излучения с учётом аппаратных ограничений по углам подсвета и рассеяния, шумов электронного тракта и рассеяния Рэлея. В качестве источника излучения использовался He-Ne лазер с длиной волны 0.6328 мкм. Рассеяние измерялось в плоскости падения $\varphi = 0^\circ$ в диапазоне углов рассеяния $\theta_\delta = 5 \div 85^\circ$ при угле падения $\theta_n = 10^\circ$. Было проанализировано восстановление эффективной величины СКО высотных параметров исследуемых профилей полированных кварцевых подложек ($\varepsilon = 2,12$) при экспоненциальной статистике распределения. Для образца с СКО высот шероховатости 1,1 нм, погрешность восстановления данной величины составило 0,044 нм.

Список литературы

1. Denisov D.G. // Applied Physics. 2022. No. 1. P. 89-96.
2. Azarova V.V., Dmitriev V.G., et al. // Quantum Electronics. 2000. V. 30. No. 4. P. 360-364.

Д.С. ЗЕМЦОВ^{1,2}, А.К. ЗЕМЦОВА^{1,2}, С.С. КОСОЛОБОВ¹,
Д.М. ЖИГУНОВ¹, А.С. СМІРНОВ¹, К.Р. ТАЗИЕВ¹,
И.А. ПШЕНИЧНЮК¹, К.Н. ГАРБУЗОВ¹, В.П. ДРАЧЕВ¹

¹*Сколковский институт науки и технологий*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

**АКТИВНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА
НА ПЛАТФОРМЕ КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ:
ТЕМПЕРАТУРНАЯ И ЭЛЕКТРОАБСОРБЦИОННАЯ
МОДУЛЯЦИЯ**

В работе представлены результаты разработки и исследования компактного интегрального электроабсорбционного модулятора на основе гибридного плазмонного волновода с внедрением оксида индия-олова. Для изготовленных устройств экспериментально продемонстрирована ширина полосы модуляции 40 ГГц по уровню -2 дБ и коэффициент экстинкции 1.8 дБ в диапазоне напряжений от -3 В до +2 В. Также в работе демонстрируются результаты экспериментального исследования температурно перестраиваемых кольцевых резонаторов со скоростью перестройки более 0.2 нм/мкс. Описанные в работе устройства разработаны для использования в диапазоне длин волн 1520 - 1620 нм.

D.S. ZEMTSOV^{1,2}, A.K. ZEMTSOVA^{1,2}, S.S. KOSOLOBOV¹,
D.M. ZHIGUNOV¹, A.S. SMIRNOV¹, K.R. TAZIEV¹,
I.A.PSHENICHNYUK¹, K.N. GARBUZOV¹, V.P. DRACHEV¹

¹*Skolkovo Institute of Science and Technology*

²*National Research Nuclear University MEPhI*

**ACTIVE INTEGRATED DEVICES
ON SILICON-ON-INSULATOR PLATFORM:
TEMPERATURE AND ELECTROABSORPTION MODULATION**

The paper presents the results of the development and research of a compact integrated electroabsorption modulator based on a hybrid plasmonic waveguide with an indium-tin oxide layer. For the manufactured devices a 40 GHz modulation bandwidth at a level of -2 dB and an extinction coefficient of 1.8 dB in the voltage range from -3 V to +2 V were experimentally demonstrated. The paper also includes the results of an experimental study of temperature tunable ring resonators with a tuning rate of more than 0.2 nm/μs. The devices described in the work are designed for the 1520 - 1620 nm wavelength range.

Электроабсорбционная модуляция с использованием прозрачного проводящего материала – это наиболее технологичный способ изготовления высокоскоростного интегрального модулятора с компактными размерами, который к тому же обладает широкой рабочей полосой в оптическом спектре. Одним из популярных прозрачных проводящих материалов является оксид индия-олова, в котором наблюдается сильный электрооптический эффект при приложении напряжения. Используя локализованную плазмонную моду, можно сосредоточить основную фракцию поля электромагнитной моды вблизи прозрачного проводящего оксида, тем самым обеспечить эффективную модуляцию и сохранить небольшие размеры устройства [1, 2].

Для низкоскоростных задач, в которых требуется микросекундное время срабатывания и не принципиальна ширина оптической полосы, возможности плазмонного электроабсорбционного модулятора излишни. Значительно проще и быстрее в изготовлении кольцевые резонаторы, перестраиваемые при помощи термооптического эффекта в кремнии. Оптимизировав геометрию титанового нагревателя над чипом можно достигнуть диапазона перестройки резонанса более чем 10 нм.

Для связи оптического волокна и интегральных фотонных чипов в нашей лаборатории используются высокоэффективные дифракционные решётки. Решётки разрабатываются при помощи алгоритма оптимизации с учётом задачи и параметров интегральной платформы. Стартовые параметры решётки для оптимизатора можно получить с помощью простого аналитического подхода, описанного в [3].

При помощи дифракционных решёток были протестированы перестраиваемые кольцевые резонаторы, продемонстрировавшие скорость перестройки более 0.2 нм/мкс и электроабсорбционные модуляторы, частотный диапазон которых составил 40 ГГц по уровню -2 дБ. Для электроабсорбционного модулятора также измерена зависимость коэффициента экстинкции от приложенного напряжения. В диапазоне напряжений от -3 В до +2 В пропускание оптического сигнала модулятором изменялось на 1.8 дБ.

Список литературы

1. Косолобов С.С. и др. Заявка на патент № 2021125699/28(054303). 2021.
2. Pshenichnyuk I.A., et al. // Phys. Rev. B. 2019. V. 100. P. 195434.
3. Zemtsov D.S., et al. // Opt. Lett. 2022. V. 47. P. 3339.

А.И. КАШАПОВ^{1,2}, Е.А. БЕЗУС^{1,2}, Д.А. БЫКОВ^{1,2},
Л.Л. ДОСКОЛОВИЧ^{1,2}

¹*Институт систем обработки изображений РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара*

²*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Рассмотрены металлодиэлектрические структуры, состоящие из чередующихся плоскопараллельных металлических и диэлектрических слоёв. Исследована возможность применения таких структур в качестве пространственно-временных оптических дифференциаторов. Показано, что указанные дифференцирующие структуры могут применяться для формирования пространственно-временных оптических импульсов, содержащих оптический вихрь.

A.I. KASHAPOV^{1,2}, E.A. BEZUS^{1,2}, D.A. BYKOV^{1,2},
L.L. DOSKOLOVICH^{1,2}

¹*Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara*

²*Samara National Research University*

SPATIOTEMPORAL OPTICAL DIFFERENTIATION WITH METAL-DIELECTRIC MULTILAYERS

We consider metal-dielectric structures consisting of a several homogeneous metal and dielectric layers. We investigate the possibility of using such structures as spatiotemporal differentiators. It is shown that the considered differentiating structures can be used to generate spatiotemporal optical vortices.

Структуры нанофотоники, реализующие операцию дифференцирования падающих оптических сигналов во времени или по пространственной координате, являются перспективными для применения в задачах обработки информации в режиме реального времени, так как обеспечивают высокую производительность и низкое энергопотребление по сравнению с цифровыми методами [1, 2].

Одной из исследуемых в данной работе структур является структура «металл-диэлектрик-металл» (МДМ-структура), представляющая из себя волноводный диэлектрический слой, расположенный между двумя

металлическими слоями (рис. 1). В предыдущей работе авторов [3] было строго показано, что в спектре МДМ-структуры всегда можно получить нуль отражения за счёт выбора толщин металлических и диэлектрических слоёв. Преимуществом указанной структуры является то, что МДМ-структура не требует призмы для ввода излучения и поэтому является существенно более компактной по сравнению с, например, дифференциаторами из работ [4, 5].

Результаты численного моделирования показали высокое качество пространственно-временного дифференцирования оптических импульсов МДМ-структурой (схематично показано на рис. 1). На рис. 2 показана численно рассчитанная амплитуда профиля отражённого импульса от МДМ-структуры. Для данного примера МДМ-структура была рассчитана специальным образом, чтобы отражённый импульс содержал оптический вихрь. Величина нормированной среднеквадратичной ошибки, описывающей отклонение амплитуды численно рассчитанного отражённого сигнала от аналитически рассчитанной «пространственно-временной» производной, составляет 0.9 %. Отметим, что «каскадные» МДМ-структуры (составленные из нескольких «одиночных» (трёхслойных) МДМ-структур) позволяют эффективно вычислять «пространственно-временные» производные высоких порядков.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00514).



Рис. 1. Геометрия МДМ-структуры и схематичное выполнение операции пространственно-временного дифференцирования

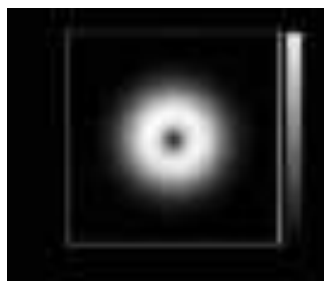


Рис. 2. Амплитуда профиля пространственно-временного импульса, отражённого от МДМ-структуры

Список литературы

1. Silva A., Monticone F., et al. // Science. 2014. V. 343. P. 161.
2. Zhou Y., Zheng H., et al. // Nat. Photonics. 2020. V. 14. P. 316.
3. Kashapov A.I., Doskolovich L.L., et al. // J. Opt. 2021. V. 23. Art.No. 023501.
4. Golovastikov N.V., Doskolovich L.L., et al. // J. Exp. Theor. Phys. 2018. V. 127. P. 202.
5. Zhang J., Ying Q., Ruan Z. // Opt. Lett. 2019. V. 44. P. 4511.

Е.В. ПРОКОФЬЕВ, Д.Д. УЧАНОВА, М.К. МОСКВИН
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ТЕХНОЛОГИЯ ЗАПИСИ ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ
НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ЗА СЧЁТ ФОРМИРОВАНИЯ
ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

В работе рассмотрена технология записи защитных голограмм на поверхности нержавеющей стали за счёт формирования лазерно-индуцированных поверхностных периодических структур (ЛИПС). Показан процесс записи и настройки защитной маркировки. Рассчитаны основные параметры, определяющие качество защитной голограммы: дифракционная эффективность, период, глубина микроструктуры. Структурирование производилось с помощью волоконного лазера с длиной волны 1,06 мкм.

E.V. PROKOFIEV, D.D. UCHANOVA, M.K. MOSKVIN
ITMO University, Saint-Petersburg

**TECHNOLOGY FOR RECORDING HOLOGRAM
FREQUENCIES ON A METAL SURFACE
FOR THE FORMATION OF LASER-INDUCED
STRUCTURAL FORMATION**

The paper considers the technology of recording protective holograms on the surface of stainless steel due to laser-induced surface periodic structures (LIPSS). Shows the process of writing and setting security markings. The main parameters that determine the quality of a security hologram are calculated: diffraction efficiency, period, and microstructure depth. Structuring was carried out using a fiber laser with a wavelength of 1.06 μm .

Во многих отраслях стоит вопрос борьбы с контрафактной продукцией [1]. Например, на рынке автозапчастей, производители размещают уникальные средства идентификации – номера и QR-коды.

Другой способ защиты продукции подразумевает нанесение на изделие голографических наклеек, однако, в настоящий момент возможно создание защитных голограмм лишь при большом объёме выпуска идентичных изделий. Так, как проектирование и запись одной оригинальной голограммы всё ещё требует больших время- и трудозатрат. Процесс очень чувствителен к условиям записи, присутствие

нежелательного света и вибрации приведёт к размытию голографических изображений, а требующаяся постэкспозиционная обработка голограмм ещё более усложняет процесс массового тиражирования [2].

Технология записи защитных голограмм основана на формировании лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИППС) периодом равным или меньше длины волны лазерного излучения. Причём благодаря этому методу, возможно, записывать как высокоупорядоченные, так и стохастические структуры, что формирует уникальность идентификационной метки. Она позволяет наносить изображения непосредственно на металлическую поверхность. Получаемые изображения имеют динамические эффекты: переключение цвета и анимацию при изменении направления освещения образца.

На рис. 1 приведены примеры записанных защитных голограмм. Период синтезированных микроструктур на защитной голограмме составлял 1 мкм. Для записи защитных голограмм могут быть использованы как растровые, так и векторные изображения. Запись производится непрерывным сканированием лазерным пучком с управлением поляризации лазерного излучения во время сканирования.

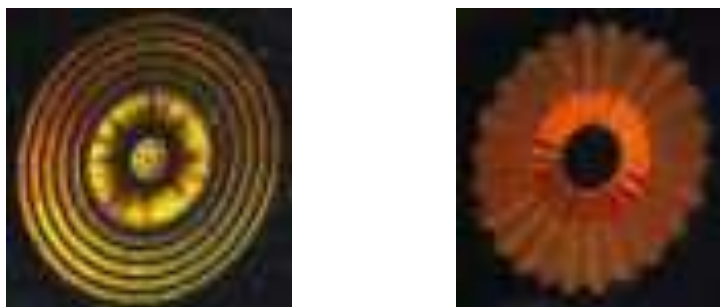


Рис. 1. Пример записанных защитных голограмм

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-79-10241.

Список литературы

1. Ломсадзе Д.Г. Теневая экономика. Проблемы борьбы с контрафактной продукцией в ЕС и России: учебное пособие для вузов. Москва: Издательство Юрайт, 2020.
2. Firsov A., et al. Fabrication of digital rainbow holograms and 3D imaging using SEM based e-beam lithography // Optics Express. 2014. V. 22. No. 23.P. 28756-28770.

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, Н.И. БУРИМОВ,
А.В. ДУБИКОВ, Д.Е. БЕЛЬСКАЯ, В.Я. ШУР¹,
А.Р. АХМАТХАНОВ¹, М.А. ЧУВАКОВА¹

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург*

ПРОВОДИМОСТЬ РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ТАНТАЛАТЕ ЛИТИЯ, ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ИЗЛУЧЕНИЕМ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 532 нм

Методом дифракции Брэгга экспериментально изучена зависимость эффективной фотоиндуцированной проводимости регулярной доменной структуры с периодом 7,99 мкм и ненаклонными доменными стенками в кристалле 1%MgO:LiTaO₃, от интенсивности зондирующего пучка с длиной волны 532 нм.

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, N.I. BURIMOV,
A.V. DUBIKOV, D.E. BELSKAYA, V.Ya. SHUR¹,
A.R. AKHMATKHANOV¹, M.A. CHUVAKOVA¹

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
¹Ural Federal University, Ekaterinburg*

PHOTOINDUCED CONDUCTIVITY OF REGULAR DOMAIN STRUCTURES IN LITHIUM TANTALATE AT A WAVELENGTH OF 532 nm

The dependence of the effective photoinduced conductivity on the intensity of probing light beam at a wavelength of 532 nm in a regular domain structure with a 7.99 mkm period in a 1%MgO:LiTaO₃ crystal with non-inclined domain walls was experimentally obtained using the Bragg diffraction in the first order.

Фотоиндуцированная проводимость регулярной доменной структуры (РДС) исследовалась методом дифракции Брэгга в первый дифракционный порядок по кинетике релаксации её эффективности на (РДС) после приложения к ней постоянного напряжения $U_0 = 200$ В разной полярности на прижимаемые к Z-плоскостям кристалла медным электродам. РДС с периодом $\Lambda = 7,99$ мкм и ориентацией вектора решётки по оси X была сформирована в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ с размерами 2×1 мм² по осям Y и Z соответственно. Пучок гауссовой формы с длиной волны 532 нм и необыкновенной поляризацией от лазера

LCM-S-111 фокусировался по координате Z цилиндрической линзой с $f=250$ мм на середину входной Y -грани кристалла, с образованием в фокальной плоскости пучка апертуры эллиптической формы $1,73 \times 0,37$ мм по уровню $1/e^2$ по осям X и Z , соответственно.

Зависимость усреднённой по объёму кристалла эффективной фотоиндуцированной проводимости σ_{eff} от пиковой интенсивности зондирующего излучения I_0 определялась из результатов экспериментов по динамике релаксации дифракционной эффективности по методике, использованной в [1] для РДС с наклонными доменными стенками в кристалле 5%MgO:LiNbO₃. Следует отметить, что для исследуемой РДС наклон доменных стенок к полярной оси Z отсутствовал. Тем не менее, в экспериментах наблюдалась зависимость $\sigma_{eff}(I_0)$, представленная символами на рис. 1. Она удовлетворительно аппроксимировалась сублинейной функцией $\sigma_{eff} = \beta_{th} \sqrt{I_0}$, показанной сплошной кривой.

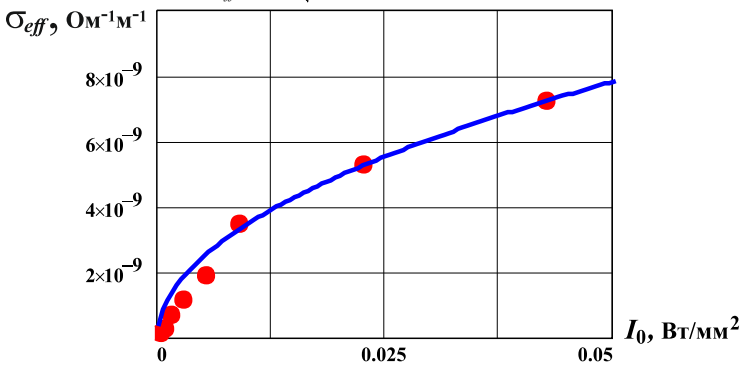


Рис. 1. Зависимость эффективной фотоиндуцированной проводимости в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ с РДС с ненаклонными доменными стенками, измерена на длине волны $\lambda = 532$ нм, точки – экспериментальные данные, кривая – аппроксимация вида $\sigma_{eff} = \beta_{th} \sqrt{I_0}$, где $\beta_{th} = 354 \cdot 10^{-9} \text{ A}^{-1} \text{ Ом}^{-3/2}$

Таким образом, наблюдаемый для РДС с ненаклонными стенками в кристалле 1%MgO:LiTaO₃ характер зависимости $\sigma_{eff}(I_0)$ отличается от обнаруженного ранее линейного закона для структуры с наклонными доменными стенками в кристалле 5%MgO:LiNbO₃ [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020-0038/3 на 2020-2022 годы.

Список литературы

1. Savchenkov E.N., et al. // Optical Materials. 2021. V. 122. P. 111813.

А.Е. СУХАНОВ, В.В. ГАЛУЦКИЙ
 Кубанский государственный университет, Краснодар

МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА С ЗАДАННЫМ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ В КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

В данной работе был исследован градиентный кристалл LiNbO_3 при различных концентрациях лития. Исследование показало, что использования градиентного кристалла позволяет сдвинуть рабочую точку модулятора в более меньшую область управляющего напряжение и улучшить электрооптические свойства модулятора.

A.E. SUKHANOV, V.V. GALUTSKY
 Kuban State University, Krasnodar

MODEL OF AN ELECTRO-OPTICAL MODULATOR WITH A GIVEN CONCENTRATION DISTRIBUTION IN A LITHIUM NIOBATE CRYSTAL

In this work, a gradient crystal of LiNbO_3 at different concentrations of lithium was investigated. The study showed that the use of a gradient crystal allows you to move the working point of the modulator to a smaller area of the control voltage and improve the electro-optical properties of the modulator.

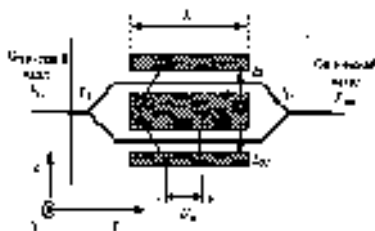


Рис. 1. Структурная схема электрооптического модулятора Маха–Цендера

Наиболее распространённым типов модуляторов, которые основаны на линейном электрооптическом эффекте, является модулятор Маха–Цендера (рис. 1), состоящий из двух Y-разветвителей, на подложке ниобата лития. Электрооптический модулятор Маха–Цендера может быть использован как амплитудный, фазовый и частотный модулятор [1], за счёт изменения показателя преломления. Разность фаз будет представлять собой выражение:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3(z) r_{33} E_z L, \quad (1)$$

где λ – длина волны оптического излучения, r_{33} – электрооптический коэффициент при комнатной температуре n_e – необыкновенная волна, E_z – внешнее электрическое поле, L – длина области электрооптического взаимодействия.

Уравнение (1) справедливо для конгруэнтного кристалла, однако на практике возникает зависимость показателя преломления от состава кристалла, его температуры и длины волны излучения [2]. Учитывая выше сказанное, можно проанализировать линейный профиль концентрации относительно его постоянного значения. Учтем, что интегрально линейный профиль должен равняться постоянному для конгруэнтного кристалла LiNbO₃, тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{d\Phi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} n_e^3(z) r_{33} \frac{U}{d}. \quad (2)$$

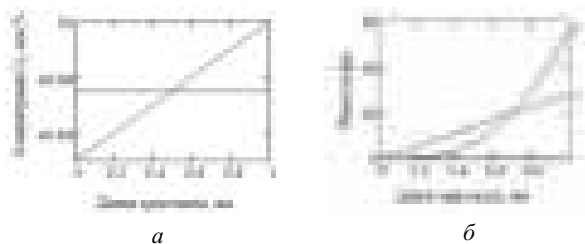


Рис. 2. Рассматриваемое изменение концентрации вдоль модулятора:
1 – постоянная, 2 – линейная (а), разность фаз для концентраций 1 и 2 (б)

Как можно увидеть на рис. 2б при линейно заданной концентрации разность фаз, начиная со значения $\Phi = 9.96$, возрастает, следовательно состав кристалла, изменяющийся линейно в пределах от 49.975 до 50, даёт возможность модулировать более высокоинтенсивный сигнал по сравнению с постоянным составом, что говорит о положительном воздействии кристалла в системе интерферометра при градиентом изменении концентрации вдоль электрооптического модулятора.

Список литературы

1. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития. Материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975.
2. Galutskiy V.V., Vatlina M.I., Stroganova E.V. // J. Cryst. Growth. 2009. V. 311. P. 1190.

И.В. КУЗНЕЦОВ, А.С. ПЕРИН

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕРТЕРА ПОЛЯРИЗАЦИИ
НА ОСНОВЕ АСИММЕТРИЧНЫХ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ
ГРЕБЕНЧАТЫХ ВОЛНОВОДОВ**

В работе приведены результаты математического моделирования конвертера поляризации на основе асимметричных тонкоплёночных гребенчатых волноводов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании интегральных транспондеров и модуляторов для систем передачи данных с уплотнением каналов по поляризации.

I.V. KUZNETSOV, A.S. PERIN

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**MODELING OF POLARIZATION CONVERTER
BASED ON ASYMMETRIC THIN-FILM RIDGE WAVEGUIDES**

This paper presents results of mathematical simulation of a polarization converter based on asymmetric thin-film ridge waveguides. The results of the work can be used in the design of integrated transponders for transmission systems with polarization channel multiplexing.

Быстрое развитие телекоммуникаций обуславливает рост требований к скорости передачи информации в линиях связи. Для передачи большего количества информации требуется мультиплексировать большее число каналов. Одним из актуальных направлений развития технологий мультиплексирования является технология уплотнения каналов с разделением по поляризации. На данный момент не существует реализаций интегральных электрооптических приемопередающих устройств, способных работать в системах с уплотнением по поляризации. Целью данной работы является математическое моделирование интегрального конвертера поляризации на основе гребенчатых тонкоплёночных волноводов с целью определения влияния конструкции преобразователя на эффективность конвертации поляризации.

В литературе известны интегральные конвертеры поляризации на основе эффекта двойного лучепреломления. Как правило, эффект двулучепреломления достигается за счёт стресс-индуцированных эффектов, а не за счёт использования двулучепреломляющих

кристаллов [1]. Сложность изготовления таких устройств заключается в необходимости подбора параметров нанесения тонкой плёнки для создания нужной механической напряжённости.

Также известны дихроичные интегральные конвертеры поляризации [2, 3]. В силу принципа своей работы, такие поляризаторы скорее подходят на роль фильтров поляризации или интегральных оптических изоляторов, чем конвертеров поляризации.

В данной работе будет рассматриваться интегральный оптический конвертер поляризации на основе асимметричных гребенчатых тонкоплёночных волноводов [4]. Топология исследуемого устройства представлена на рис. 1. На рис. 2 представлена зависимость эффективности конвертации мод от величины расстояния L_1 . Параметры моделирования приведены в табл. 1.

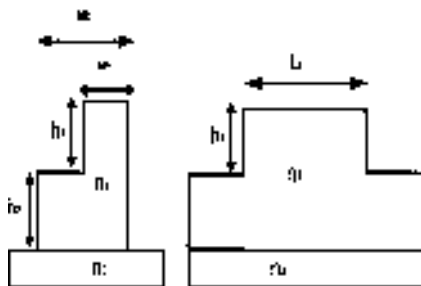


Рис. 1. Геометрия волноводной структуры

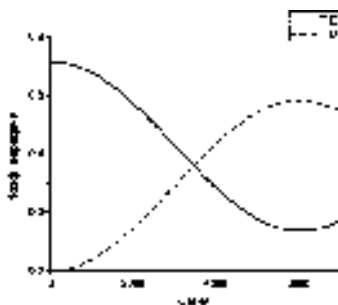


Рис. 2. Эффективность преобразования мод от L_1

Таблица 1. Параметры моделирования

n_1	n_2	h_1 , мкм	h_2 , мкм	w_1 , мкм	w_2 , мкм	λ , мкм
1,47	1,45	3	3	4	9	1,55

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2022-0004 «Исследование и разработка способов изготовления интегральных оптических волноводов и элементов на их основе»).

Список литературы

1. Milošević M.M., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2008. V. 26(13). P. 1840-1846.
2. Gao L., et al. // Scientific Reports. 2015. V. 5(1). P. 1-6.
3. Zheng J., et al. // Nanomaterials. 2021. V. 11(8). P. 2145
4. Elfiqui A.E., et al. // IEEE Photonics Technology Letters. 2022. V. 34(2). P. 109-112.

С.А. БЫЧКОВА, Л.В. МАКСИМОВ, Ф.А. МИНАКОВ,
А.С. СИНЬКО^{1,2}, Н.Н. КОЗЛОВА³, Н.А. НИКОЛАЕВ

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

³*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография
и фотоника» РАН, Москва*

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПОЛУОРГАНИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА GUHP

Приведены результаты создания оптического стенда поляризационной ТГц-спектроскопии на базе непрерывного перестраиваемого источника (0,1 - 1,1 ТГц) и решёточных поляризаторов. Исследованы его характеристики и проведена калибровка. Измерен угол поворота главных оптических осей кристаллов с разным типом сингонии LBO и GUHP. Измерены спектры показателя преломления и коэффициента поглощения оси X кристалла GUHP в диапазоне частот 0,2 - 2,2 ТГц, а также охарактеризованы пики поглощения. Полученные данные хорошо согласуются с результатами полученными методом КРС.

S.A. BYCHKOVA, L.V. MAKSIMOV, F.A. MINAKOV,
A.S. SINKO^{1,2}, N.N. KOZLOVA³, N.A. NIKOLAEV

Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura*

³*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics»
of the RAS, Moscow*

POLARIZATION TERAHERTZ SPECTROSCOPY OF A SEMI-ORGANIC GUHP CRYSTAL

The results of the creation of an optical bench for polarization THz spectroscopy based on a continuous tunable source (0.1 - 1.1 THz) and grating polarizers are presented. Its characteristics are investigated and calibration is carried out. The angle of rotation of the main optical axes of crystals with different types of syngony LBO and GUHP has been measured. The spectra of the refractive index and the absorption coefficient of the X axis of the GUHP crystal were measured in the frequency range 0.2 - 2.2 THz, and the absorption peaks were also characterized. The data obtained are in good agreement with the results obtained by the Raman method.

Несмотря на эффективное развитие терагерцового (ТГц) диапазона, источники излучения с высокой спектральной яркостью до сих пор не доступны. Один из способов генерации терагерцового излучения заключается в использовании кристалла с высоким нелинейно-оптическим коэффициентом для преобразования интенсивного лазерного импульса в терагерцовый диапазон. Создание эффективных генераторов терагерцового излучения во многом зависит от поиска и исследования новых нелинейно-оптических кристаллов (или других материалов).

В связи с этим в работе проводились исследования оптических свойств нового моноклинного полуорганического кристалла гидрофосфата гуанилмочевины – GUNP, перспективного для эффективного оптико-терагерцового преобразования. [1].

Разработана оптическая схема – поляризационный ТГц-спектрометр на основе непрерывно перестраиваемого источника. Используются широкополосные поляризаторы, на основе алюминиевой решётки, напылённой на тонкую полипропиленовую подложку. Исследованы характеристики установки и проведена его калибровка. Измерен угол поворота главных оптических осей кристаллов LBO и GUNP относительно кристаллографических. Дисперсия показателя преломления и коэффициента поглощения от 0,2 до 2,2 ТГц измерены на широкополосном терагерцовом спектрометре. Охарактеризованы пики поглощения оси x в окрестности 1,45 и 1,85 ТГц и с высокой точностью измерены оптические свойства в окрестности 1,5 ТГц, в которой наблюдается эффективная генерация ТГц-излучения под лазерной накачкой.

Список литературы

1. Sinko A., et al. A monoclinic semiorganic molecular crystal GUNP for terahertz photonics and optoelectronics // Scientific Reports. 2021, V/. 11 (1).

Г.Р. САГАТЕЛЯН, А.В. САМОРОДОВ, В.С. КОНДРАТЕНКО¹,
Е.Р. ПИСКУНОВА, А.С. КУЗНЕЦОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹*МИРЭА – Российский технологический университет*

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦВЕТОВОЙ КАЛИБРОВОЧНОЙ МЕРЫ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОГО ГИСТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Разработана технология изготовления цветовой калибровочной меры, которая предоставляет широкие возможности распознавания цветов при компьютерном анализе оптико-микроскопических изображений. Вырезанные из стандартизированного набора оптических цветных стёкол, отшлифованные и отполированные пластины образуют 97 оптически прозрачных цветовых полей, вписываясь в габариты 75 x 52 x 1,5 мм предметного стекла оптического микроскопа.

G.R. SAGATELYAN, A.V. SAMORODOV, V.S. KONDRATENKO¹,
E.R. PISKUNOVA, A.S. KUZNETSOV

Bauman Moscow State Technical University
¹*MIREA – Russian Technological University*

FABRICATION OF THE CALIBER FOR COLOR MEASUREMENT DURING THE COMPUTERIZED HISTOLOGICAL ANALYSIS

A technology for manufacturing a color calibration measure has been developed, which provides extensive color recognition capabilities for computer analysis of optical-microscopic images. Cut from a standardized set of optical colored glasses, grinded and polished plates form 97 optically transparent color fields, are fitting the dimensions of the optical microscope 75 x 52 x 1.5 mm slide.

Цветовые калибровочные меры, изготавливаемые из полимерных материалов в соответствии с имеющимися стандартами [1] на эталоны для цветных принтеров, непригодны для компьютеризации оптико-микроскопических исследований в клинично-диагностических лабораториях вследствие недостаточной интенсивности и однородности цветов при 1500-кратных увеличениях.

Требуемыми свойствами обладают оптические стёкла светофильтров, доступные в виде набора из 97 плоскопараллельных пластин размерами

40 x 40 мм и толщиной 1,5 - 4 мм. К комплекту пластин прилагается паспорт, содержащий спектры пропускания для каждой из марок. Перемножение спектра пропускания каждого из цветовых полей на спектр излучения применяемого на конкретном цифровом оптическом микроскопе осветителя позволяет определять точку эталонного белого и идентифицировать цвет вводимого в препарат красителя.

Технология изготовления калибровочной меры заключается в нарезании склеенного столбика пластин на полосы (рис. 1), их двухстороннее полирование на специально разработанном стенке [3] и наклеивание между двумя оптически прозрачными подложками.

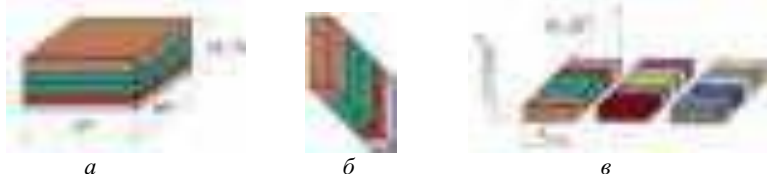


Рис. 1. Изготовления цветовых полей калибровочной меры: склеивание пластин в столбик (а); разрезание столбика на полосы (б) размещение полос на подложке (в)

Конструктивно изделие содержит утончённое предметное стекло размером 25 x 75 мм, на который наклеен набор полос, составленных из цветовых полей, поверх которого наклеено покровное стекло, вырезанное в размер на лазерной установке (рис. 2). После изготовления изделия уточняют спектры пропускания каждого из цветовых полей.

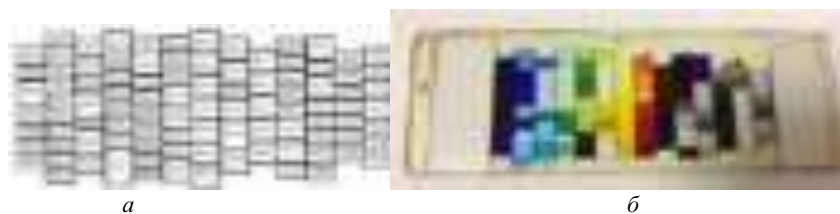


Рис. 2. Опытный образец цветовой калибровочной меры: карта расположения цветовых полей (а); общий вид изготовленного образца (б)

Список литературы

1. ISO 12641:2016-1. Graphic technology – Prepress digital data exchange – Color targets for input scanner calibration - Part 1: Color targets for input scanner calibration.
2. Махов Д.С., Сагателян Г.Р., Самородов А.В. Цветовая мера для калибровки систем цифровой микроскопии // Измерительная техника. 2021. №10/ С. 60- 63.
3. Сагателян Г.Р., Пискунова Е.Р., Дубовик Н.Н., Кузнецов А.С. Исследование кинематики нового станка для двухстороннего полирования оптических плоскопараллельных пластин // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2022. № 3. С. 47-55.

И.А. ШУКЛОВ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ХИМИЯ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА В ЗОЛЯХ И ТОНКИХ ПЛЁНКАХ

Коллоидные квантовые точки халькогенидов свинца являются одними из наиболее перспективных материалов для фотосенсорики в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Приведены результаты по синтезу коллоидных квантовых точек халькогенидов свинца с узким распределением по размерам и исследования процесса замены лигандов в тонких плёнках. Предложены новые методы для решения данных задач.

I.A. SHUKLOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

CHEMISTRY OF LEAD CHALCOGENIDE COLLOIDAL QUANTUM DOTS IN SOLS AND THIN FILMS

Lead chalcogenide colloidal quantum dots are promising nanomaterials exhibiting an excellent photosensitivity in the near-IR and mid-IR ranges. Bulk materials PbS and PbSe QDs have band gaps in the range from 0.3 to 2.0 eV. Several aspects associated preparation of nanocrystals with narrow size-distribution and chemistry in thin films will be highlighted.

Коллоидные квантовые точки халькогенидов свинца (PbZ, Z = S, Se) привлекают к себе пристальное внимание научного сообщества и индустрии, т.к. они обладают отличной фоточувствительностью в диапазоне ближнего/среднего ИК, и шириной запрещённой зоны от 0.3 до 2.0 эВ. [1] Уникальное сочетание широкополосного поглощения в сочетании с большим радиусом экситона Бора (18 и 46 нм для PbS и PbSe, соответственно) делает халькогениды свинца перспективными материалами для применений в солнечных батареях, фотодетекторах и электролюминесцентных устройствах [2].

Для практического применения коллоидных квантовых точек и создания фотосенсоров на их основе требуются методы получения ККТ данных халькогенидов для разных диапазонов спектра. Синтез ККТ PbS свинца с узким распределением по размерам для частиц малого размера

(менее 4 нм), среднего размера (4 - 12 нм) и крупных (12 - 20 нм) требует разных подходов.

В течении последних трёх лет в нашей лаборатории были разработаны подходы к нескольким типам ККТ PbS. Синтез ККТ PbS малого размера с первым экситонным пиком от 760 нм был осуществлён за счёт замедления роста ККТ тиолами на стадии синтеза (рис. 1). Были найдены условия пост-синтетической обработки ККТ, позволяющие достичь долговременной коллоидной стабильности [3]. Метод «старения» ККТ PbS позволяет использовать более крупные нанокристаллы для получения наночастиц меньшего размера [4]. Этот метод не требует применения сложного оборудования и максимально прост в применении.

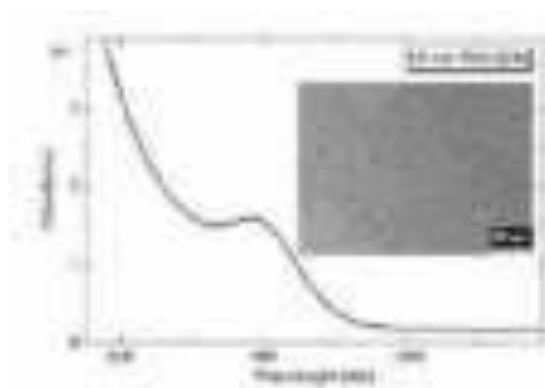


Рис. 1. Спектр поглощения и микрофотография ПЭМ ККТ PbS диаметром 2.5 нм

Также проведено изучение скорости замены лигандов в плёнках ККТ PbS с помощью приставки МНПВО [5].

Список литературы

1. Shuklov I.A., Razumov V.F. // Russian Chemical Reviews. 2020. V. 89, P. 379.
2. García de Arquer F.P., Talapin D.V., Klimov V.I., Arakawa Y., Bayer M., Sargent E.H. // Science. 2021. V. 373. P. 8541.
3. Ganeev R.A., Shuklov I.A., Zvyagin A.I., Dyomkin D.V., et al. // Optical Materials. 2021. V. 121. P. 111499.
4. Shuklov I.A., Toknova V.F., Lizunova A.A., Razumov V.F. // Materials Today Chemistry. 2020. V. 18. P. 100357.
5. Шуклов И.А., Демкин Д.В., Конавичева В.А., Попов В.С., Разумов В.Ф. // Прикладная физика. 2022. №6. С. 35-42.

Ю.Д. ЛАНТУХ

Оренбургский государственный университет

БИОПОЛИМЕРНАЯ СИСТЕМА ХИТОЗАН – КРАСИТЕЛЬ КАК ПРОТОТИП АКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СРЕДЫ

В работе получены биополимерные плёночные образцы хитозана, активированного органическим красителем сульфородаминоом В, оптического качества. Наблюдалось усиление спонтанной люминесценции красителя при накачке импульсным лазерным излучением. Предложено использовать такие системы как активную среду органических лазеров на красителях.

Yu.D. LANTUKH

Orenburg State University

BIOPOLYMER SYSTEM OF CHITOSAN-DYE AS A PROTOTYPE OF ACTIVE LASER MEDIUM

In this work, biopolymer film samples of chitosan activated with an organic dye sulforhodamine B of optical quality were obtained. An increase in the spontaneous luminescence of the dye was observed upon pumping with pulsed laser radiation. It is proposed to use such systems as the active medium of organic dye lasers.

Материалы на основе систем краситель-полимер, активно трансформирующие энергию светового воздействия, находят применение в молекулярной фотонике [1 - 3].

Целью настоящей работы являлось изучение комплексов анионных молекул органических красителей с хитозаном (поликатион) в плёночной форме и целенаправленное изменение свойств таких комплексов для создания прототипов оптоэлектронных устройств на базе указанных материалов.

Поскольку хитозан является поликатионным полимером, то связывание анионных красителей с ним должно (в случае антикооперативного характера такого связывания) приводить к формированию комплексов мономерный краситель – хитозан с высокой плотностью упаковки красителя (методика самосборки наноструктур типа «снизу-вверх»). Люминесцентный канал дезактивации энергии электронного возбуждения (квантовый выход флуоресценции) в молекуле красителя в этом случае должен быть максимально высоким. На этом базируется подход создания плёночного активного элемента лазера на красителях.

В работе использовали хитозан (MP Biomedicals) и Сульфородамин В (СВ) (Sigma). Оптические спектры регистрировали на оптоволоконном спектрометре AvaSpec 2048 (Avantes). Для возбуждения флуоресценции использовали DPSS YAG-Nd CW лазер KLM-532/SLN (ФТИ-Оptronик). В качестве импульсного источника возбуждения флуоресценции использовали YAG-Nd лазер LQ-129 (Солар ЛС).

Введение СВ в матрицу хитозана приводит к формированию комплексов «мономер красителя – биополимер», что значительно уменьшает количество ассоциатов красителя в системе и способствует развитию люминесцентного канала дезактивации энергии возбуждения.

На рис. 1 представлены спектры люминесценции плёночной системы СВ – хитозан при импульсном возбуждении второй гармоникой YAG-Nd лазера ($\lambda = 532$ нм) по схеме с поперечной накачкой. Концентрация красителя в плёнке составляла 8×10^{-5} моль/л.

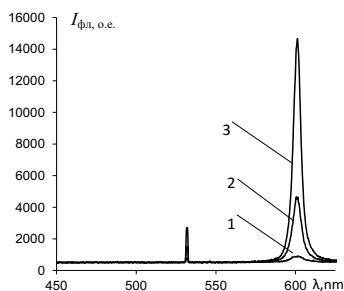


Рис. 1. Спектры люминесценции плёнки сульфородамин В – хитозан

Из рис. 1 видно, что по мере увеличения энергии накачки от 0,26 мДж (кривая 1) до 1,25 мДж (кривая 2) и 2,55 мДж (кривая 3) имеет место резкое нелинейное увеличение интенсивности сигнала и сужение его спектра. Также происходило сужение индикатрисы люминесцентного сигнала до нескольких мрад. Всё это свидетельствует о проявлении в данной системе эффекта суперлюминесценции красителя.

Полученный результат можно использовать для создания активных сред твердотельных органических лазеров на красителях.

Список литературы

1. Лантух Ю.Д., Пашкевич С.Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110 (6). С. 932.
2. Лантух Ю.Д., Пашкевич С.Н. // Вестник ОГУ. 2012. № 12. С. 113.
3. Лантух Ю.Д., Пашкевич С.Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 2013. Т. 114 (2). С. 312.

К.Д. КОСОЛАПОВА, М.Д. МИРУЩЕНКО, Е.В. УШАКОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ ТОЧЕК
НА ОСНОВЕ ЛИМОННОЙ КИСЛОТЫ
И ЭТИЛЕНДИАМИНА, ОБРАБОТАННЫХ ПОЛИМЕРАМИ**

Исследована морфология поверхности углеродных точек с добавками в виде полимеров и её влияние на энергетическую структуру углеродных наночастиц (УТ). Полученные результаты данной работы позволят определить природу люминесцентных центров углеродных точек и степень влияния различных добавочных веществ в виде гидрофильных полимеров на оптические свойства этих люминесцентных центров.

K.D. KOSOLAPOVA, M.D. MIRUSCHENKO, E.V. USHAKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

**INVESTIGATION OF OPTICAL PROPERTIES AND ENERGY
STRUCTURE OF CARBON DOTS BASED ON CITRIC ACID
AND ETHYLENDIAMINE TREATED WITH POLYMERS**

The study of carbon dot's surface morphology with polymers and its influence on the carbon nanoparticle's energy structure has been carried out. The obtained results of this work will allow us to determine the nature of the carbon dots luminescent centers and the influence of various additional substances in the form of hydrophilic polymers on the optical properties of these luminescent centers.

Углеродные точки (УТ) представляют собой новый класс наноструктур, представители которого обладают уникальными свойствами, а именно высокой фотостабильностью, химической инертностью, поглощением в оптической области и высокой биосовместимостью [1]. Вскоре после их открытия стало понятно, что основные оптические свойства УТ могут быть стабилизированы, улучшены и изменены при помощи пассивации или функционализации их поверхности.

Целью работы является исследование энергетической структуры и оптических свойств УТ в зависимости от типа добавочного полимера. В данной работе объектом исследования стали УТ, синтезированные гидротермальным синтезом с использованием лимонной кислоты (citric

acid, CA) и этилендиамина (ethylenediamine, EDA) в соотношении 1:0.33. В качестве добавочных веществ для модификации химического состава поверхности УТ выступали полимеры: полиэтиленгликоль (polyethylene glycol, PEG) и поливинилпирролидон (polyvinylpyrrolidone, PVP).

Химия поверхности функционализированных углеродных наночастиц была исследована с помощью инфракрасной спектроскопии (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR), полученные спектры приведены на рис. 1.

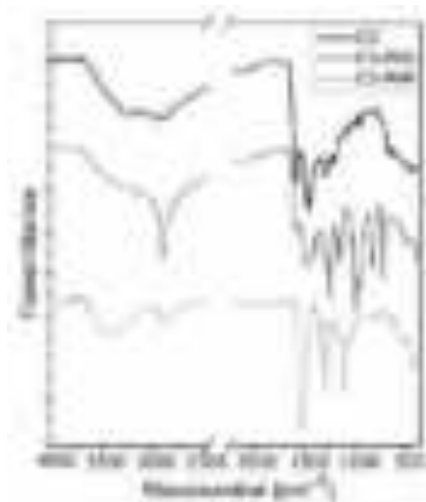


Рис. 1. FTIR спектры углеродных точек: CD без добавок (чёрный), CD-PEG (тёмно-серый), CD-PVP (светло-серый)

FTIR спектры образцов УТ различаются: новые пики поглощения появляются в спектрах функционализированных частиц. Изменение химического состава УТ при помощи добавления полимеров говорит о появлении новых молекулярных групп на поверхности. Комплексное исследование приведёт к получению новой информации о том, как морфология углеродных точек влияет на их оптические свойства и энергетическую структуру.

Список литературы

1. Li D., et al. Optical properties of carbon dots in the deep-red to near-infrared region are attractive for biomedical applications //Small. 2021. P. 2102325.

Т. МИЛЕНКОВИЧ, И.А. ШУКЛОВ, В.Ф. РАЗУМОВ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАМЕНЫ ЛИГАНДОВ НА СВОЙСТВА ФОТОРЕЗИСТОРОВ, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ТЕЛЛУРИДА РТУТИ

В рамках работы были исследованы характеристики тонких плёнок коллоидных квантовых точек (ККТ) теллурида ртути в зависимости от замены лигандов. Слои ККТ HgTe были получены методом dip-coating, анализ морфологии поверхности и толщины слоёв были установлены с помощью атомно-силовой микроскопии. Нанесением ККТ HgT с послойной заменой на встречно-штыревые электроды были изготовлены фоторезисторы и определены их вольт-амперные характеристики.

T. MILENKOVICH, I.A. SHUKLOV, V.F. RAZUMOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

STUDY OF THE EFFECT OF LIGAND EXCHANGE ON THE PROPERTIES OF PHOTORESISTORS BASED ON MERCURY TELLURIDE COLLOIDAL QUANTUM DOTS

Ligand-exchange dependent properties of HgTe colloidal quantum dots thin films were studied Layer-by-layer deposition technique applying dip-coating was used for preparing thin films of colloidal quantum dots of mercury telluride. Analysis of the surface morphology and thickness of the films was determined by using atomic force microscopy (AFM). Various ligand exchanges were tested for the preparation of photoresistors. Voltage-current characteristics of the fabricated devices were determined.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) представляют собой полупроводниковые нанокристаллы, поверхность которых покрыта лигандами. Их оптические свойства, в силу квантово-размерного эффекта зависят от диаметра полупроводникового ядра.

Коллоидные квантовые точки (ККТ) теллурида ртути из-за своих уникальных свойств привлекают к себе в последнее десятилетие пристальное внимание. [1] ККТ на основе теллурида ртути являются перспективными кандидатами для использования в различных областях науки и техники, в силу уникальной комбинации большого радиуса

экситона Бора (30 нм) и шириной запрещённой зоны (0 eV) для объёмного материала. Это обеспечивает спектральную перестройку свойств ККТ от ближнего до дальнего ИК-диапазона. Ведется разработка фотодетекторов, лазеров и применений в приборах для телекоммуникации [2, 3].

Из коллоидных квантовых точек создаются фоточувствительные тонкие плёнки для применения в фотоустройствах. Фотоэлектрические свойства тонких плёнок сильно зависят от состава лигандной оболочки [4, 5].

В рамках работы, были проведено нанесение ККТ на стеклянные подложки и встречно-штыревые электроды методом dip-coating, методом послойного нанесения. Морфология поверхности и шероховатость полученных плёнок исследована с помощью атомно-силовой микроскопии. Также были проанализированы толщины плёнок в зависимости от различных замен лигандов. Были созданы фоторезисторы путём нанесения слоёв коллоидных квантовых точек теллурида ртути на золотые встречно-штыревые электроды и для них определены вольт-амперные характеристики.

В рамках работы были измерены как темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ), так и ВАХ при засветке лазером при 980 нм, для тонких плёнок ККТ HgTe после замены исходной олеатной оболочки на I^- , S^{2-} , SCN^- и этандитиол-1,2, полученные данные проанализированы.

Список литературы

1. Lhullier E., et al., Mercury chalcogenide quantum dots: material perspective for device integration // Chem. Rev. 2021. V. 121. No. 7. P. 3627-3700.
2. Keuleyan S., Guyot-Sionnest P., Delerue C., Guy A. Mercury telluride colloidal quantum dots: electronic structure, size-dependant spectra and photocurrent detection up to 12 μm // ASC Nano. 2014. V/ 8. No. 8. P. 8676-8682.
3. Chen M., Haipeng L., Abdelazim N., Zhu Y., Mercury telluride quantum dot based phototransistor enabling high sensitivity room temperature photodetection at 2000 nm // ASC Nano. 2017. V. 11. No. 6. P. 5614-5622.
4. Boles M., Ling D., Hyeon T., et al. The surface science of nanocrystals // Nature Mater. 2016. V. 15. P. 141-153.
5. Shuklov I.A., Razumov V.F. Lead chalcogenide quantum dots for photoelectric devices // Russ. Chem. Rev. 2020. V. 89. No. 3. P. 379-391.

А.А. МАРДИНИ, И.А. ШУКЛОВ, В.Ф. РАЗУМОВ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

**СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ КОЛЛОИДНЫХ
КВАНТОВЫХ ТОЧЕК Теллурида РТУТИ,
ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕКУРСОРОВ
НА ОСНОВЕ ФОСФИНОВ**

Изучен синтез коллоидных квантовых точек теллурида ртути с поглощением в ИК-диапазоне при использовании ряда фосфин-теллуридов в качестве прекурсоров. Были исследованы трис(диметиламино) фосфин теллурид и триоктилфосфин теллурид как прекурсоры теллура. Первый был впервые применён для синтеза наночастиц HgTe. Край полосы поглощения полученных нанокристаллов HgTe находился в пределах от 1,6 до 5 мкм (SWIR – MWIR).

A.A. MARDINI, I.A. SHUKLOV, V.F. RAZUMOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

**SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF MERCURY
TELLURIDE COLLOIDAL QUANTUM DOTS APPLYING
PHOSPHINE-BASED PRECURSORS**

Mercury telluride colloidal quantum dots for infrared applications were synthesized using phosphine-tellurium precursors. Tris(dimethylamino)phosphine telluride as a new tellurium precursor and tri-n-octylphosphine telluride were employed in the synthesis of HgTe CQDs. The absorption band edge of the obtained nanocrystals was between 1.6 - 5 μm (SWIR – MWIR).

Коллоидные квантовые точки (ККТ) теллурида ртути являются одним из самых перспективных материалов для ближнего и среднего ИК-диапазона [1]. Запрещённая зона в массиве HgTe оценивается в -0.141 eV при 300 K, что в сочетании с квантово-размерным эффектом, делает ККТ HgTe крайне интересным для применений в ИК-диапазоне [2], включая сенсоры, фотодетекторы, лазеры и системы визуализации [3].

Неагрегированные коллоидные квантовые точки HgTe размером до 6 нм были получены используя высокотемпературный коллоидный синтез. В качестве прекурсора ртути использовался раствор ртути в олеиламине. В качестве прекурсоров теллура были исследованы триоктилфосфин теллурид (ТОРТе) и трис(диметиламино)фосфин теллурид (ТДМАРТе).

Полученные ККТ HgTe были охарактеризованы рядом физико-химических методов (рис. 1), таких как просвечивающая электронная микроскопия, рентгенодифракционный анализ, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, фурье-ИК-спектроскопия и рамановская спектроскопия. Было исследовано изменение спектральных характеристик ККТ HgTe при изменении температуры впрыска и температуры реакции, а также времени реакции. Было показано что TDMAPTe обладает большей реакционной способностью по сравнению с TOPTe. С этим прекурсором удалось получить образцы HgTe ККТ с шириной запрещённой зоны в 0.95 эВ. Максимумы экситонных пиков, полученных нанокристаллов варьировались в ИК-диапазоне от 1.6 до 5 мкм.

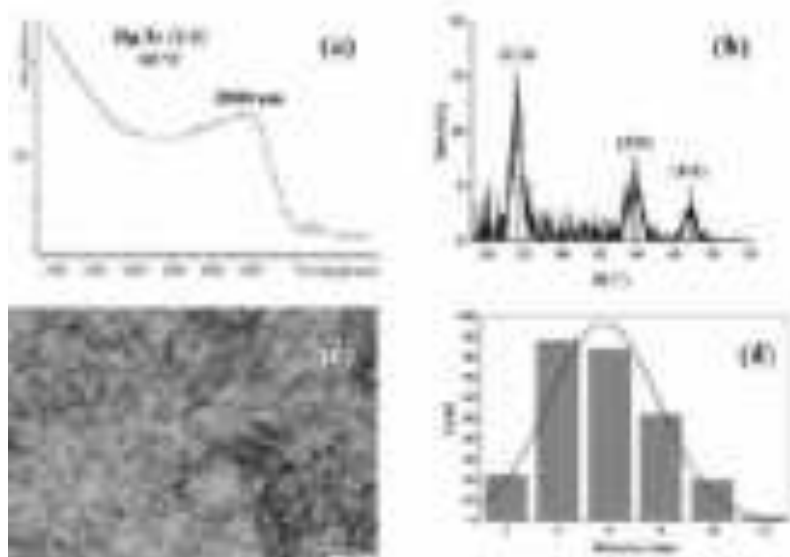


Рис. 1. Спектр поглощения (a), XRD-дифрактограмма (b), микрофотография ПЭМ (c), распределение по размерам HgTe ККТ (d)

Список литературы

1. Shuklov I.A., et al. Mechanistic insights into the synthesis of telluride colloidal quantum dots with trioctylphosphine-tellurium // *ChemistrySelect*. 2020. V. 5 (38). P. 11896-11900.
2. Kim S., et al. Bandgap engineered monodisperse and stable mercury telluride quantum dots and their application for near-infrared photodetection // *Journal of Materials Chemistry*. 2011. V. 21 (39). P. 15232-15236.
3. Brichkin S.B., Razumov V.F. Colloidal quantum dots: synthesis, properties and applications // *Russian Chemical Reviews*. 2016. V. 85 (12). P. 1297-1312.

А.В. ШЕСТЕРИКОВ^{1,2}, М.Ю. ГУБИН^{1,2}, С.М. НОВИКОВ²,
Р.В. КИРТАЕВ², А.В. АРСЕНИН², А.В. ПРОХОРОВ^{1,2},
В.С. ВОЛКОВ²

¹*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых*
²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

КРОСС-ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ НА ОСНОВЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ КУБОИДОВ С ДЕФЕКТОМ ФОРМЫ

Рассмотрена задача управления резонансным откликом одиночных наночастиц кремния неправильной формы и изготовленных из них метаповерхностей. Проведена численная оптимизация и с использованием созданных на её основе метаповерхностей обнаружен кросс-поляризационный эффект, связанный с перекачкой энергии в поляризационную компоненту отражённого света, ортогональную вектору напряжённости линейно-поляризованной электромагнитной волны падающего света.

A.V. SHESTERIKOV^{1,2}, M.Yu. GUBIN^{1,2}, S.M. NOVIKOV²,
R.V. KIRTAEV², A.V. ARSENIN², A.V. PROKHOROV^{1,2},
V.S. VOLKOV²

¹*Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs*
²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

CROSS-POLARIZATION EFFECTS IN METASURFACES BASED ON SILICON NANOCUBOIDS WITH A DEFECT

The problem of controlling the resonant response of single silicon nanoparticles of irregular shape and metasurfaces fabricated from them is considered. Based on the numerical optimization, we fabricated the metasurfaces and found the cross-polarization effect for them associated with the energy transfer into the polarization component of reflected light, which is orthogonal to the electric field strength vector of a linearly polarized electromagnetic wave of the incident light.

На основе численного моделирования установлено, что в кремниевых наночастицах в форме кубоида с малым дефектом одного из рёбер могут наблюдаться резонансы неосновных компонент дипольных моментов, ориентированных перпендикулярно волновому вектору падающей волны, спектральное положение которых совпадает с резонансами для основных компонент диполей. Изучено влияние диэлектрической подложки и

установлено, что её присутствие не нарушало эффекта формирования неосновной дипольной компоненты. Разработан дизайн состоящей из кремниевых кубоидов метаповерхности на кварцевой подложке и выполнен расчёт спектров рассеяния для кубоида из состава метаповерхности, а также спектров отражения/ пропускания для всей метаповерхности. Установлена слабая зависимость положения резонансов неосновных дипольных компонент для кубоида из состава метаповерхности от её периода и достаточно точное соответствие их длин волн длинам волн резонансов для одиночного кубоида, рис. 1а. Предложена стратегия проектирования и изготовления поляризационных метаповерхностей, основанная на совпадении резонансных частот основных компонент для возбуждаемого в правильном кубоиде диполя и его неосновных компонент в кубоиде с дефектом. Сравнение измеренных спектров отражения для созданных на основе дизайнов метаповерхностей показало их хорошее согласие с рассчитанными, рис. 1б. В спектрах отражения метаповерхности кросс-поляризационный эффект наблюдается на длине волны 680 нм, что связано с возбуждением неосновной компоненты магнитного диполя, а также на 800 нм, что связано с неосновной компонентой электрического диполя.

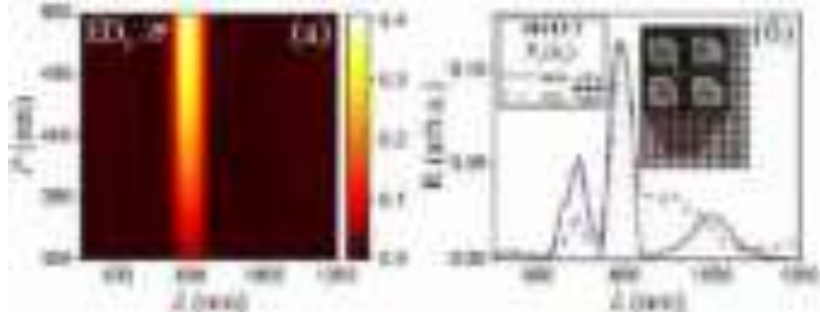


Рис. 1. Контурная зависимость для вклада компоненты p_y в мультиполь ED к полному сечению рассеяния σ отдельного кубоида из состава метаповерхности, помещённой на SiO_2 подложку и облучаемой волной $E_x(k_z)$ (а), сравнение численно рассчитанных и экспериментально измеренных спектров отражения от метаповерхности при ортогональной ориентации плоскостей пропускания поляризатора и анализатора, параметры кубоида: $h = 210$ нм, радиус выреза $R_d = 85$ нм, период решётки $P = 400$ нм (б)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, гранты 20-12-00343 и 21-19-00675. А.В. Шестериков благодарит Фонд содействия инновациям за поддержку (СТАРТ-1, № 4484ГС1/72620).

А.Д. УТЮШЕВ, Р.В. ГАПОНЕНКО, А.А. ЩЕРБАКОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

УСИЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНО-ДИПОЛЬНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРИСУТСТВИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ

Обнаружены режимы усиления флуоресценции магнитного излучения, обусловленного магнитными дипольными переходами трёхвалентных редкоземельных ионов, находящихся внутри или вблизи диэлектрических однородных сфер, на три порядка. Определён ряд конфигураций, включающих параметры сферы и радиальное положение редкоземельного излучателя, при которых коэффициент связи перехода приближается к предельному значению ≈ 1 , означающему, что в переходах с данного уровня полностью доминирует магнитодипольный переход.

A.D. UTYUSHEV, R.V. GAPONENKO, A.A. SHCHERBAKOV
ITMO University, Saint-Petersburg

ENHANCEMENT MAGNETIC DIPOLE EMISSION IN THE PRESENCE OF A SPHERICAL PARTICLE

We discover regimes for promoting fluorescence of magnetic light due to magnetic dipole transitions of trivalent rare-earth ions located inside or near dielectric homogeneous spheres by three orders of magnitude were found. A number of configurations, including sphere parameters and the radial position of the rare-earth emitter, at which the transition coupling coefficient approaches the limit value ≈ 1 , which means that the transitions from a given level are completely dominated by the magnetic dipole transition, have been determined.

В последние годы наблюдается растущий интерес к генерации излучения, возникающего при магнитодипольных (МД) переходах [1 - 3]. МД взаимодействие со светом обычно слабее, чем при электродипольное (ЭД), если бы такая генерация была легкодоступна, можно было бы значительно расширить и дополнить существующий набор электромагнитных применений, который основан на излучении, генерируемом в ЭД переходах, таких как наноантенны [4], фотонные кристаллы [5] и метаматериалы [6]. Стоит отметить, что для некоторых квантовых излучателей, таких как редкоземельные ионы, для которых ЭД переходы могут быть запрещены, сила МД переходов может быть

сравнима или даже больше, чем у ЭД переходов. Перспективным направлением является реализация таких систем, которые позволят усилить генерацию излучения МД переходов редкоземельными ионами. Так же причиной использования ионов является то, что в процессе легирования заряженные ионы можно ускорять и направлять в определённом направлении.

В рамках проделанной работы, с помощью метода Т-матриц и сопутствующего ему программного обеспечения “STRATIFY” [7], было проведено теоретическое исследование усиления генерации излучения, возникающего при МД переходах, редкоземельными ионами. Получены конфигурации, при которых коэффициент связи МД перехода, относительно других переходов, может быть существенно увеличен и достигать максимального значения, близкого к 1. Кроме того, получены результаты оптимизации режимов стимулирования флуоресценции за счёт магнитодипольных переходов в трёхвалентных редкоземельных ионах, находящихся снаружи или внутри сферической частицы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-11-00153.

Список литературы

1. Li J., et al. // ASC Phot. 2017. V. 4. P. 1889-1898.
2. Baranov D.G., et al. // Phot. Rev. 2017. V. 11. P. 1060026.
3. Darvishzadeh-Varcheie M., et al. // Opt. Lett. 2019. V. 44 P. 4957-4960.
4. Pelton M. // Nat. Phot. 2015. V. 9. P. 427.
5. Fujita M., et al. // Science. 2005. V. 9. P. 1296-1298.
6. Simovski C.R., et al. // Adv. Mater. 2012. V. 24. P. 4229.
7. Rasskazov I.L., et al. // OSA Continuum. 2020. V. 3. P. 2290.

Д.А. КАФЕЕВА, Ю.И. ЯНДЫБАЕВА, И.А. ГЛАДСКИХ,
Н.А. ТОРОПОВ, Т.А. ВАРТАНЯН, Д.Р. ДАДАДЖАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОЧАСТИЦ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦАХ

Коллоидные растворы серебряных наночастиц вытянутой формы были получены методом направленного роста из зародышей путём восстановления AgNO_3 аскорбиновой кислотой. Для изучения анизотропных оптических свойств серебряные наночастицы были внедрены в полимерную плёнку из поливинилового спирта (ПВС). Было исследовано влияние одноосного растяжения полимерной плёнки с серебряными наночастицами на соотношения их продольного и поперечного плазмонных резонансов.

D.A. KAFEEVA, Yu.I. YANDYBAEVA, I.A. GLADSKIKH,
N.A. TOROPOV, T.A. VARTANYAN, D.R. DADADZHANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE OPTICAL ANISOTROPY OF SILVER NANOPARTICLES IN POLYMER MATRICES

Colloidal solutions of elongated silver nanoparticles were obtained by directed growth from nuclei by reduction of AgNO_3 with ascorbic acid. To study the anisotropic optical properties, silver nanoparticles were embedded in a polymer film made of polyvinyl alcohol (PVA). The effect of uniaxial stretching of a polymer film with silver nanoparticles on the ratio of their longitudinal and transverse plasmon resonances was studied.

Оптические свойства плазмонных наночастиц определяются, прежде всего, их формой, размером, диэлектрическим окружением и пространственным расположением [1]. Например, оптические свойства вытянутых плазмонных наночастиц представляют особый интерес, поскольку при увеличении соотношения размеров сторон происходит расщепление спектра поглощения на две моды за счёт возбуждения продольного и поперечного плазмонов. С точки зрения применения продольная мода локализованного плазмонного резонанса является наиболее привлекательной, поскольку её можно возбуждать светом в более широком спектральном диапазоне от среднего видимого до

ближнего инфракрасного. Однако приложения, основанные на возбуждении продольного локализованного плазмонного резонанса в наностержнях (НС), могут работать с максимальной эффективностью только в том случае, если они используют либо одиночный НС, либо ансамбль полностью упорядоченных НС. В случае если НС ориентированы случайным образом, то их оптические свойства усредняются, чувствительность снижается и функционируют они менее эффективно. Однако, для получения упорядоченного ансамбля НС зачастую прибегают к различным дорогостоящим и трудозатратным методам. В качестве альтернативных подходов упорядочивание НС может быть достигнуто за счёт растягивания термопластичной плёнки с нанокompозитами [2].

В данном исследовании серебряные НС были синтезированы методом направленного роста из зародышей путём восстановления серебра аскорбиновой кислотой в присутствии цетилтриметиламмоний бромида из нитрата серебра. Анализ спектров поглощения коллоидных растворов НС показал присутствие двух выраженных максимумов, что соответствует возбуждению поперечного и продольного плазмонного резонансов. Ориентирование НС проводилось за счёт одноосного растяжения нанокompозитной плёнки при её нагреве до температуры размягчения полимера. Анизотропия композитной плёнки была изучена при возбуждении нанокompозитной плёнки линейно-поляризованным светом. Было показано, что нерастянутые нанокompозитные плёнки обладают изотропными оптическими свойствами. Это связано со случайной ориентацией НС, усредняющей их индивидуальную анизотропию. С другой стороны, растянутые нанокompозитные плёнки оптически анизотропны, поскольку моды продольного и поперечного плазмонов могут быть возбуждены только светом, поляризованным параллельно и перпендикулярно оси растяжения плёнки, соответственно. Таким образом, дихроичные свойства НС, внедрённых в полимер, могут быть применены в приложениях для визуализации, нелинейной оптики, фототермии или кодирования данных [3].

Исследование проведено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-10098), гранта НИРМА Физико-технического факультета Университета ИТМО.

Список литературы

1. Wang, et al. // Nanophotonics. 2018. V. 7. No. 9. P. 1533-1556.
2. Hormozi-Nezhad M.R., et al. // Coll. and Surf. A: Physicochem. and Eng. Asp. 2012. V. 393. P. 46-52.
3. Van der Zande B.M.I., et al. // The Jour. of Phys. Chem. B. 1999. V. 103. No. 28. P. 5761-5767.

А.В. КАЗАНЦЕВА¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ОГРАНИЧЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДОМ ТЕРМОМЕТРИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Приведены результаты экспериментов по исследованию локальной температуры стеклования одномерных полимерных структур методом термометрии комбинационного рассеяния света. Определён диапазон температур, при котором происходит стеклообразный переход в образце. Продемонстрировано влияние размерных эффектов на термохимические свойства полимерных микроструктур.

A. V. KAZANTSEVA¹, S. S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

INVESTIGATION OF SPATIALLY LIMITED POLYMERS BY RAMAN THERMOMETRY

Presents the result of experiments on the study of the local glass transition temperature of one-dimensional polymer structures by Raman thermometry. Was determined the temperature range of the sample's glassy transition. The influence of dimensional effects on the thermochemical properties of polymer microstructures is demonstrated.

Методом позволяющим создавать трёхмерные микроструктуры различного архитектурного дизайна с поразительной точностью является двухфотонная полимеризация (ДФП) [1]. В предыдущей работе мы собрали спектры усиленного зондом комбинационного рассеяния света полимерных наностержней с субволновым пространственным разрешением для исследования степени конверсии структур [2]. Целью данной работы является изучение термохимических свойств акриловой полимерной наноструктуры. Дело в том, что при уменьшении размера структур до размеров молекулярной глобулы свойства лежащего в основе материала начинают кардинально меняться из-за увеличения соотношения поверхности к объёму. Для изучения физико-химических свойств дорожек на наномасштабе снимали спектры комбинационного рассеяния света со

спектральным разрешением $1,3 \text{ см}^{-1}$ с использованием решётки 600 мм^{-1} в диапазоне температур от 30 до 150 °C с шагом 5 °C . В связи с тем, что при нагревании образец расширялся и происходила дефокусировка оптической системы необходимо было модернизировать установку и обеспечить обратную связь для контроля фокусного пятна на поверхности объекта, рис. 1. На рис. 2 приведена зависимость спектров КР от температуры в полимерной микроструктуре. Температура стеклования полимерного образца отслеживалась по скачку интенсивности спектров КР. Скачок наблюдался в диапазоне $90 - 104 \text{ °C}$. В то время как в объёмном состоянии макромасштаба подобный материал обладает температурой стеклования в районе 500 °C . Причиной уменьшения температуры стеклования полимера в пять раз является влияние размерных эффектов: в случае нанодорожки преобладание поверхности над объёмом. Результаты данной работы прокладывают путь к лучшему пониманию процессов фотополимеризации на наномасштабе.

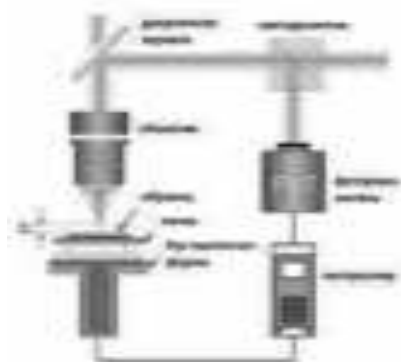


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

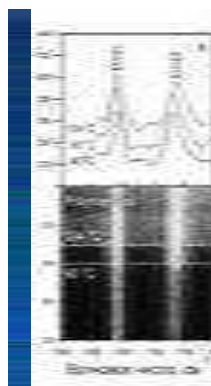


Рис. 2. Карта КР полимера в зависимости от температуры

Изучение методом термометрии КР финансировалось за счёт субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету по государственному заданию в сфере научной деятельности (ФЗСМ-2022-0021).

Список литературы

1. Maruo S., Fourkas J.T. // Laser Photonics Rev. 2008. No. 2. P. 100-111.
2. Kazantseva A.V., et al. // Journal of Physics: Photonics. 2021. No. 3. P. 1-11.

Г.Р. ВОСКАНИЯН^{2,3}, Н.С. КУРОЧКИН^{1,2}, А.В. ГРИЦИЕНКО^{1,2},
В.В. СЫЧЕВ^{1,2}, С.П. ЕЛИСЕЕВ¹

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

³*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

ЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ АЛМАЗНЫХ ЦЕНТРОВ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

В данной работе исследуются НРПТ (high pressure and high temperature) микрокристаллы алмаза со средним размером 4 мкм, содержащие никелевые (Ni) дефекты, люминесцирующие в ближнем ИК-диапазоне. Продемонстрирована зависимость спектральных и временных свойств излучения Ni дефектов от температуры в диапазоне от комнатной до 70 °С.

G.R. VOSKANYAN^{2,3}, N.S. KUROCHKIN^{1,2}, A.V. GRITSIENKO^{1,2},
V.V. SYCHEV^{1,2}, S.P. ELISEEV¹

¹*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

³*Bauman Moscow State Technical University*

LUMINESCENT THERMOMETRY OF DIAMOND CENTERS IN THE INFRARED RANGE

In this work НРПТ (high pressure and high temperature) diamond microcrystals with an average size of 4 μm containing nickel (Ni) defects luminescing in the near IR range are investigated. The temperature dependence of the spectral and temporal properties of the radiation of Ni defects on temperature is demonstrated in the range from room temperature to 70 °С.

Измерение температуры в нано и микромасштабах является важной задачей во многих областях исследований, таких как клеточная биология, медицина, высокоомощная электроника, разработка двигателей, полупроводников и микрофлюидных устройств [1]. Одним из подходов в этом направлении является использование люминесцентных свойств излучающих объектов (люминесцентная термометрия), например, квантовых точек, органических красителей, дефектов а алмазе и двумерных материалах [2]. Особенно перспективными являются центры окраски в алмазах, обладающие высокой фотостабильностью и

биосовместимостью [3]. В приложении к биологическим применениям наиболее интересны излучатели, излучающие в ближнем ИК-диапазоне. Кроме SiV центров в этом диапазоне лежит люминесценция Ni алмазных центров с переходом на 1.4 эВ [4]. Данные центры имеют дублет на 883/885 нм и обычно неизбежно входят в структуру синтетических алмазов в процессе их роста при использовании Ni катализаторов.

Целью работы являлось экспериментальное исследование спектрально-кинетических свойств Ni дефектов в алмазах со средним размером 4 мкм, полученных при высоких давлениях и температурах (НРНТ), в зависимости от температуры. На рис. 1 представлено изменение спектра Ni линии с увеличением температуры. Происходит уширение спектра за счёт усиления электрон-фононного взаимодействия и соответствующее падение пика люминесценции. Кроме того, на длине волны 870 нм наблюдается изомиссионная точка. Вычислены температурные чувствительности пика и времени затухания люминесценции (рис. 2), которые составили соответственно 0,56 % °C⁻¹ и 0,42 % °C⁻¹ при комнатной температуре.

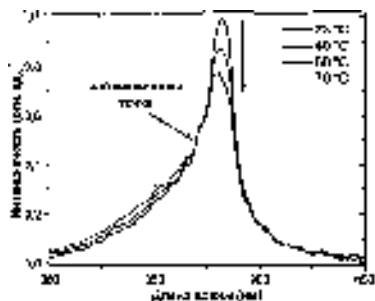


Рис. 1. Спектры Ni дефектов в алмазе при разных температурах, вертикальной стрелкой показано направление изменения пика люминесценции с увеличением температуры

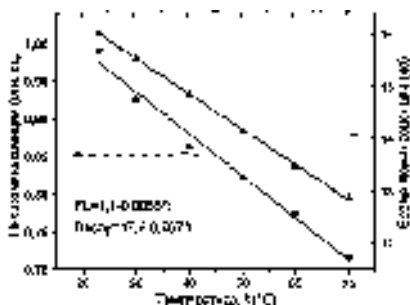


Рис. 2. Зависимости интенсивности пика и времени затухания люминесценции Ni дефектов в алмазе от температуры

Работа была выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-29-01046.

Список литературы

1. Bradac C., Lim S.F., et al. // *Advanced Optical Materials*. 2020. V. 8 (15). P. 2000183.
2. Chen Y., Tran T.N., et al. // *ACS applied materials & interfaces*. 2020. V. 12 (22). P. 25464.
3. Golubewa L., et al. // *Advanced Optical Materials*. 2022. P. 2200631.
4. Alkahtani M.H., et al. // *Optics Letters*. 2018. V. 43 (14). P. 3317-3320.

В.А. ДОНЧЕНКО, А.А. ЗЕМЛЯНОВ, Р.В. РЯМБОВ

Национальный исследовательский Томский государственный университет

АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ ОТ ВОДНОГО АЭРОЗОЛЯ С НАНОЧАСТИЦАМИ СЕРЕБРА ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Приведены экспериментально полученные зависимости акустических сигналов от энергии фемтосекундных импульсов в режиме филаментации, распространяющихся в жидкокапельном аэрозоле с наночастицами различной концентрации, имитирующими ядра Айткена. Показано, что под действием филамента фемтосекундного импульса струя водного аэрозоля разбивается на две струи.

V.A. DONCHENKO, A.A. ZEMLYANOV, R.V. RYAMBOV

National Research Tomsk State University, Tomsk

ACOUSTIC SIGNALS FROM AQUEOUS AEROSOL WITH SILVER NANOPARTICLES UNDER IRRADIATION WITH FEMTOSECOND LASER PULSES

The experimentally obtained dependences of acoustic signals on the energy of femtosecond pulses in the filamentation mode propagating in a liquid-drop aerosol with nanoparticles of various concentrations imitating Aitken nuclei are presented. It is shown that, under the action of a femtosecond pulse filament, a water aerosol jet breaks into two jets.

Перенос световой энергии на большие расстояния и лазерное зондирование окружающей среды входят в число основных проблем современной атмосферной оптики. Эффективной передаче лазерной энергии препятствует наличие облаков и туманов, в которых лазерное излучение существенно ослабевает. Для решения этой проблемы в ведущих научных центрах мира активно применяются технологии лазерной филаментации фемтосекундных импульсов. В [1] экспериментально показано, что связанная с филаментом ударная волна выталкивает из области распространения лазерного импульса частицы аэрозоля. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования зависимости величины акустического сигнала от водного

аэрозоля с наночастицами, имитирующими частицы Айткена, от энергии фемтосекундных импульсов в режиме филаментации. Для проведения эксперимента была собрана экспериментальная установка, схема, которой представлена на рис. 1. На рис.2 представлена фотография филамента, проходящего через струю жидко-капельного аэрозоля.

Из рис. 2 видно, что под действием филамента происходит разбиение струи жидко-капельного аэрозоля. Вероятной причиной разбиения струи является образование акустической волны при филаментации [1]. Зависимость величины акустического сигнала от энергии фемтосекундного импульса накачки показана на рис. 3.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – Ti:Sa лазер, 2 – генератор аэрозоля, 3 – фотоаппарат, 4 – микрофон, 5 – осциллограф

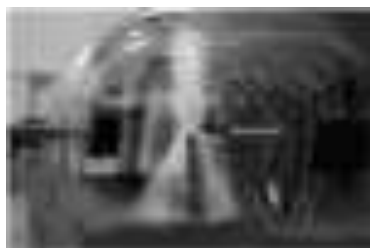


Рис. 2. Разбиение струи водного аэрозоля фемтосекундным импульсом в режиме филаментации

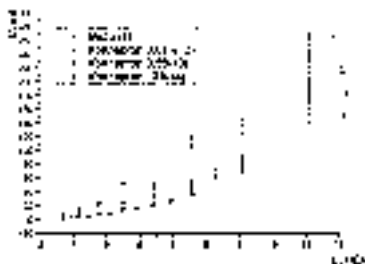


Рис. 3. Зависимость величины акустического сигнала от энергии фемтосекундного импульса в водном аэрозоле, в водном аэрозоле с наночастицами серебра (колларгол) различной концентрации

Зависимости величины акустических сигналов от энергии накачки для чистой воды и воды с наночастицами серебра с концентрациями 0,01 % и 0,5 % приблизительно совпадают. В то время как темпы роста величины акустического сигнала от энергии накачки для воды с наночастицами серебра с концентрацией 10 % значительно выше.

Список литературы

1. Schimmel G, Produit T, Mongin D., et al. Free space laser telecommunication through fog // Optica. 2018. V. 5. No. 10. P. 1338-1341.

Л.Р. ПЕТРАШКО^{1,2}, А.В. ОВЧАРОВ³, В.С. ЖИГАРЬКОВ²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Институт фотонных технологий ФНИИ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

³*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ БИОПЕЧАТИ

Произведён СЭМ-анализ металлических частиц, полученных в результате абляции тонких плёнок на основе золота, титана и хрома, применяемых в биопечати. Построены распределения наночастиц по размерам.

L.R. PETRASHKO^{1,2}, A.V. OVCHAROV³, V.S. ZHIGARKOV²

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

³*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow*

CHARACTERIZATION OF METAL NANOPARTICLES ARISING FROM LASER BIOPRINTING

SEM analysis of metal particles obtained by ablation of thin films based on Au, Ti and Cr, used in bioprinting, was carried out. The size distributions of nanoparticles are plotted.

В настоящее время биопечать на основе прямого лазерно-индуцированного переноса (LIFT) [1] с поверхности поглощающей металлической плёнки гелевых микрокапель широко применяется для задач медицины и биотехнологии. Например, с помощью лазерной биопечати клеток млекопитающих создают многослойные клеточные конструкции [2], используемые в тканевой инженерии. Кроме того, высокая степень локализации лазерного излучения и перенос крайне малых объёмов геля позволяют проводить разделение микробных клеток, взятых из сложных природных гетерогенных сред [3].

Однако такой метод печати предполагает, что частицы металла могут переноситься вместе с клетками [4, 5] и оказывать негативное влияние на их жизнедеятельность в процессе клеточного роста. Как известно, в зависимости от формы, размера и концентрации металлических частиц, с которыми контактирует клетка, степень токсического воздействия может быть различной [6].

Целью работы является исследование характеристик полученных наночастиц на основе золота, титана и хрома. Для получения достаточного для исследования количества металлических частиц была проведена абляция тонких металлических плёнок последовательными наносекундными импульсами на поверхности кюветы с водой (рис. 1). Рабочий диапазон энергий при этом составил 16 - 45 мкДж (диаметр перетяжки 30 мкм). Размеры, форма, состав наночастиц определены посредством сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором. По полученным СЭМ-изображениям (рис. 2) построены распределения наночастиц по размерам в зависимости от энергии лазерного импульса. Результаты позволяют оценить концентрацию металлических частиц в напечатанных микрокаплях, что позволит ответить в дальнейшем на вопрос о влиянии наночастиц на жизнеспособность и функциональные особенности перенесённых клеток.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части получения тонких плёнок, гранта РФФ 20-14-00286 в части абляции. Часть работы, связанная с микроскопией образцов, была выполнена на оборудовании Ресурсного центра зондовой и электронной микроскопии (Курчатовский комплекс НБИКС-технологий, НИЦ «Курчатовский институт»).

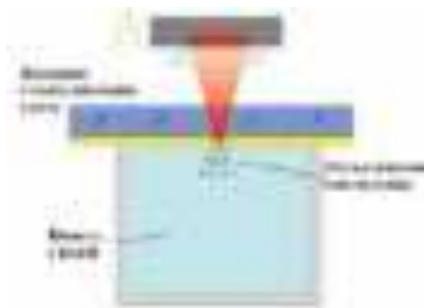


Рис. 1. Схема экспериментальной установки



Рис. 2. СЭМ-изображение частиц титана

Список литературы

1. Serra P., et. al. // Cell and Organ Printing. 2010. P. 53-80.
2. Barron J.A., et. al. // Biomedical Microdevices. 2004. V. 6. P. 139-147.
3. Yusupov V.I., et al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. No. 6. P. 065604.
4. Zhigarkov V.S., et. al. // Quantum Electronics. 2020. V. 50 No. 12. P. 1134.
5. Zhigarkov V.S., et al. // Nanomaterials. 2021. V. 11. No. 10. P. 2584.
6. Fokina A.I., et. al. // Theoretical and applied ecology. 2015. No. 2.

В.С. МАКИН, Р.С. МАКИН¹

*Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения – филиал
АО «Корпорация «Комета», Санкт-Петербург*

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ОПТИЧЕСКИЙ СКИРМИОН
КАК САМООРГАНИЗАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВАЯ
ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ**

Предложена концепция устойчивой самоорганизационной топологической структуры, возникающей при взаимодействии лазерного излучения с конденсированной средой – оптического скирмиона (ОС). Показано квантование характерного пространственного масштаба ОС и приведены экспериментальные реализации для наносекундных и ультракоротких длительностей на материалах с существенно различными физическими свойствами

V. S. MAKIN, R. S. MAKIN¹

*Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes - Branch
of JSC «Kometa Corporation», Saint-Petersburg*

¹National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**OPTICAL SKYRMION AS STABLE SELF-ORGANIZED
TOPOLOGICAL STRUCTURE UNDER LASER RADIATION
INTERACTION WITH CONDENSED MEDIA**

Proposed the model of optical skyrmion (OS) – as stable self-organized topological structure under laser radiation interaction with condensed media. The quantum feature of OS spatial scale and experimental realizations for nanosecond and ultrafast durations on materials with different physical properties are shown.

При взаимодействии импульсов поляризованного лазерного излучения (ЛИ) с конденсированными средами образуются упорядоченные гексагональные структуры [1, 2]. Предложена концепция нелинейного топологического квантового объекта – оптического скирмиона (ОС) [3, 4] объяснения явления. Топологические ОС характеризуются (мета)устойчивостью, что следует из фундаментального свойства запутанности, например, спинового и орбитального угловых моментов квантовых объектов [2]. Экспериментально наблюдались масштабы структур $\sim \lambda$, $\sim \lambda/2$, $\sim \lambda/4$ [1, 5]; гексагональные структуры (ОС) с

пространственными масштабами $\sim 64\lambda/\pi\eta$ и $\sim 96\lambda/\pi\eta$ были обнаружены на поверхности кремния [6, 7]. Эти периоды принадлежат порядку Шарковского [1]. Проанализирован ряд опубликованных результатов, где наблюдалось образование упорядоченных структур как на поверхностях, так и в приповерхностных слоях конденсированных сред (металлах, полупроводниках) под действием ЛИ наносекундной и фемтосекундной длительностей. Анализ показал, что суправолновые структуры при воздействии УКИ излучения образуются на поверхностях конденсированных сред в соответствии с нелинейной математической моделью (НММ) в рамках универсальной поляритонной модели (УПМ) [1, 3] образования пространственных периодов структур. Экспериментальные данные интерпретированы на основе концепции топологического квантового объекта [8] – ОС; пространственный масштаб ОС, периоды структур изменяются кратно длине волны лазерного ЛИ и описывается, согласно УПМ+НММ, последовательностью порядка Шарковского (универсальность Фейгенбаума) [1]. Экспериментальные реализации ОС демонстрируют изменение пространственного масштаба от $\lambda/6$ до 192λ (на три порядка) на металлах и полупроводниках. Концепция (УПМ+НММ) универсально описывает формирование пространственных периодов как суправолновых, так и субволновых структур в широком диапазоне длин волн и длительностей ЛИ.

Мы полагаем, что фундаментальные закономерности нелинейной динамики – порядок (теорема) Шарковского, универсальность Фейгенбаума – применимы к анализу рассматриваемых квантовых явлений. На основе концепции ОС сделан вывод о существовании нелинейном квантовом механизме формирования топологических (мета)устойчивых гексагональных метаструктур, согласно концепции УПМ+НММ [1, 3]. Полученные результаты могут быть использованы для целенаправленного формирования микро- и наноструктур на поверхностях и в объёме конденсированных сред, в том числе для придания им новых функциональных свойств.

Список литературы

1. Макин В.С., Макин Р.С. // Оптический журнал. 2020. Т. 128. № 2. С. 272-276.
2. Romano J.M., Garcia-Giron A., et al. // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 440. P. 162-169.
3. Макин В.С., Макин Р.С. // Межд. конфер. «Прикладная оптика». 2020. 6-9.
4. Tsesses S., Ostrovsky E., et al. // Science. 2018. V. 361. No. 6406. P. 993-996.
5. Saleh A.A., Rudenko A., et al. // Nanoscale. 2020. V. 12. P. 6609-6616.
6. Chen X.Y., Lim J., et al. // Appl. Phys. A. 2009. V. 94. P. 649-656.
7. Ahmeed K.M.T., Grambow C., et al. // Micromachines. 2014. V. 5. P. 1219-1253.
8. Dai Y., Zhou Z., et al. // Nature. 2020. V. 588. P. 616-619.

Е.О. ЕПИФАНОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ

*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

ВЛИЯНИЕ СРЕДЫ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО CO₂ НА СФОКУСИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ПУЧОК ПРИ АБЛЯЦИИ

При абляции мишени в сверхкритическом диоксиде углерода (scCO₂) наблюдаемый поперечный размер области воздействия значительно превышает аналогичный размер при абляции в воздухе. Цель работы заключалась в попытке объяснить полученный эффект и установить происходит ли изменение радиуса перетяжки при абляции в сверхкритическом флюиде. Проводилась абляция мишени из серебра наносекундными импульсами на воздухе и в scCO₂. Показано, что расширение области воздействия в scCO₂ происходит без увеличения радиуса перетяжки из-за флуктуаций траектории лазерного пучка.

E.O. EPIFANOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV

*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

INFLUENCE OF A SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE ON A FOCUSED LASER BEAM DURING ABLATION

During ablation of a metal target in supercritical carbon dioxide (scCO₂), the observed transverse size of the affected area is much larger than that for ablation in air. The aim of this work was to try to explain the obtained effect and to establish whether the waist radius changes during ablation in a supercritical fluid. The silver target was ablated by nanosecond pulses in air and in scCO₂. It is shown that the expansion of the impact area in scCO₂ occurs without increasing the waist radius due to fluctuations in the trajectory of the laser beam.

Сочетание сверхкритических флюидных (СКФ) и лазерных технологий предоставляет уникальные возможности для синтеза наночастиц и микроструктурирования различных материалов. Недавно авторами был обнаружен интересный эффект значительного увеличения области воздействия лазерного излучения на поверхность мишени во время абляции в scCO₂, по сравнению с аналогичной областью для воздуха. В работе использовался волоконный лазер с $\lambda = 1064$ нм, энергией в импульсе 1 мДж, $\tau = 2$ нс и $v = 2$ кГц. Мишень была закреплена в реакторе высокого давления. Была проведена серия экспериментов по абляции

мишени в двух средах в разных фазовых состояниях с различным количеством импульсов (1 - 1000).

Как видно из рис. 1, размер лазерной перетяжки при абляции в scCO_2 не изменяется. В то же время наблюдается значительное расширение размера пятна с увеличением количества импульсов. В качестве возможного объяснения наблюдаемого расширения пятна рассматривалось влияние выбросов плазмы, материала мишени и возникающих конвективных потоков. Поскольку при абляции на воздухе первые два фактора тоже присутствуют, то можно заключить, что расширение пятна связано с возникновением конвективных потоков, вызванных лазерным нагревом мишени. Конвективные потоки, возникающие на воздухе, оказывают существенно меньшее влияние на распространение лазерного пучка из-за значительно более низкой плотности.

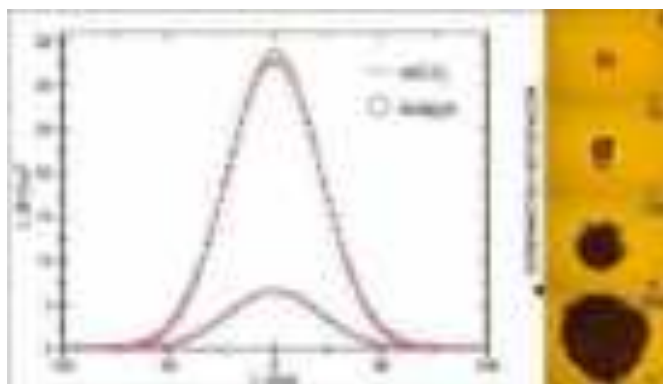


Рис. 1. Фотография поверхности мишени после лазерной абляции в scCO_2 разным количеством импульсов и распределение интенсивности в лазерном пятне, определённое по следам воздействия в воздухе и в scCO_2

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных технологий и Российского фонда фундаментальных исследований.

И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ,
О.А. РУЛЕВ, Д.В. СИНИЦИН, А.В. ШУТОВ
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

СО₂-ЛАЗЕР АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА

Запущен СО₂-лазер с длительностью генерации от 100 до 600 нс при атмосферном давлении активной среды и пиковой мощностью до 0.2 МВт. Лазер реализован на базе коммерческой установки ЭЛИ-91М от эксимерного лазера путём замены оптических элементов и подбора параметров газовой смеси.

I.O. KINYAEVSKIY, Yu.M. KLIMACHEV, A.Yu. KOZLOV,
O.A. RULEV, D.V. SINITSYN, A.V. SHUTOV
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

CO₂ LASER OF ATMOSPHERIC PRESSURE ON THE BASIS OF INSTALLATION FOR EXCIMER LASER

A CO₂ laser with a lasing duration from 100 to 600 nanoseconds at atmospheric pressure of the active medium and a peak power of up to 0.2 MW was launched. The laser was realized on the basis of the commercial installation ELI-91M from an excimer laser by replacing optical elements and selecting the parameters of the gas mixture.

ТЕА СО₂-лазеры с давлением активной среды в доли атмосферы являются давно и хорошо изученными и промышленно изготавливаемыми лазерами. Однако для ряда применений, например, в нанолитографических установках для создания плазмы, генерирующей излучение на длине волны 13.5 нм [1], требуются мощные лазеры с короткой, порядка 100 нс, длительностью импульсов. Для получения коротких импульсов, СО₂-лазер должен иметь высокое, порядка атмосферы, давление активной среды, но ТЕА СО₂-лазеры с такими параметрами не являются широко распространённым коммерческим продуктом. В тоже время такие СО₂-лазеры, имеют общий принцип конструкции системы предионизации с эксимерными лазерами высокого давления [2], в том числе выпускаемыми серийно (например, [3]).

Задачей наших исследований было получение генерации на смесях для СО₂-лазера на серийно выпускаемой в СССР лазерной установке ЭЛИ-91М для эксимерных лазеров (длительность эксимерного излучения от 20 до 40 нс). Резонатор лазера формировался глухим сферическим

(радиус кривизны 3 м) зеркалом и плоскопараллельной пластиной из ZnSe в качестве выходного зеркала.

Экспериментально удалось подобрать оптимальный состав газовой смеси ($\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 1:1:8$), при которой работоспособность установки сохранялась и была продолжительной и устойчивой при атмосферном давлении газовой смеси. Пиковая мощность CO_2 -излучения в моноимпульсном режиме доходила до 150 кВт. При использовании встроенного в установку частотного режима генерации импульсов пиковая мощность на частоте 10 Гц достигала 200 кВт, и 80 кВт на частоте 50 Гц (рис. 1 и 2). Длина волны CO_2 -излучения составила 10.55 мкм. В частотном режиме при 10 Гц появилась ещё одна линия – 10.532 мкм.

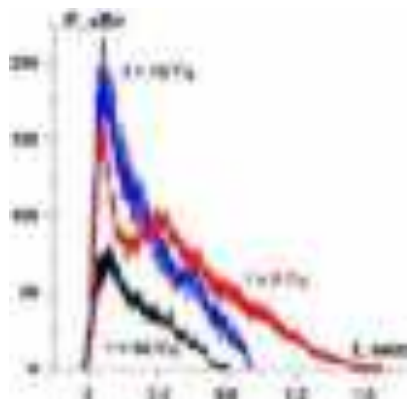


Рис. 1. Зависимость мощности CO_2 -лазера от времени при различных частотах генерации

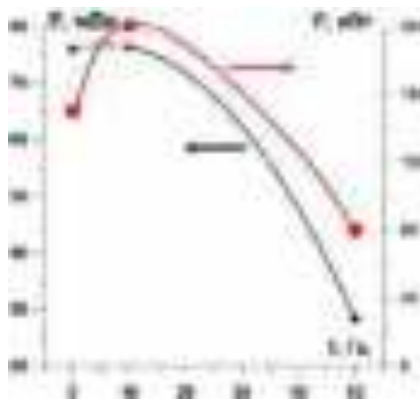


Рис. 2. Зависимость энергии импульса и пиковой мощности излучения CO_2 -лазера от частоты генерации

Уменьшение доли азота в два раза в смеси позволяло существенно сократить длительность первого пика CO_2 -излучения до 100 - 150 нс. Увеличение доли азота свыше доли CO_2 приводило к пропаданию разряда предионизации, шнурованию ТЕА разряда и выходу из строя (пробитию одного из конденсаторов) установки ЭЛИ-91М при давлениях смеси свыше 1 атм.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-79-10068.

Список литературы

1. Nowak K.M., Ohta T., Suganuma T., et al. // Opto-Electron. Rev. 2013. V. 21, P. 345.
2. Bergmann von H.M. // South African Journal of Science. 2005. V. 101. P. 75.
3. The Most Powerful UV Excimer Multigas Lasers Lambda Physik 100/200 Series. 1982.

И.Е. ПЕРМЯКОВА, А.А. ИВАНОВ¹, О.П. ЧЕРНОГОРОВА²

*Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии
им. И.П. Бардина, Москва*

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭКСИМЕРНЫМ ЛАЗЕРОМ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

Приведены результаты экспериментов по модификации поверхности и объёмов быстрозакалённых лент аморфных сплавов с помощью наносекундных импульсов эксимерного ультрафиолетового лазера. Определены условия (режимы) формирования аморфно-нанокристаллических композитов. Проведена оценка их механических свойств после лазерного воздействия.

I.E. PERMYAKOVA, A.A. IVANOV¹, O.P. CHERNOGOROVA²

Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy, Moscow

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the RAS, Moscow*

EFFECT OF EXCIMER LASER IRRADIATION ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF AMORPHOUS ALLOYS

The experimental results of surface and volumes modification of melt-quenched ribbons of amorphous alloys using single nanosecond pulses of an excimer ultraviolet laser are presented. The conditions (regimes) for the formation of amorphous-nanocrystalline composites are determined. The evaluation of their mechanical properties after laser exposure has been carried out.

Эксимерные лазеры предоставляют отличные возможности для прецизионной обработки материалов [1, 2]. Актуальной задачей является изучение механического поведения и структурно-фазовых превращений в аморфных сплавах (АС) при обработке эксимерным ультрафиолетовым (УФ) KrF-лазером ($\lambda = 248$ нм, $\tau = 20$ нс).

Проведено численное моделирование тепловых полей в ленточных АС систем Co-Fe-Cr-Si-B, Fe-Ni-B, Ti-Ni-Cu при импульсном УФ лазерном облучении для подбора и оптимизации режимов лазерной обработки.

Изучена морфология поверхностных слоёв АС Fe_{53.3}Ni_{26.5}B_{20.2} в зависимости от интенсивности лазерной обработки (числа импульсов n). При $n < 200$ отмечается улучшение качества поверхности АС, уменьшение

шероховатости и микропор. При $n > 300$ на краю зоны лазерной обработки наблюдаются складки. Их образование обусловлено генерированием ударных волн, которые распространяясь вглубь АС, перемещают на поверхности расплавленные слои, затвердевающие позже. При $n > 700$ происходит наложение складок и формирование уплотнённого края области лазерного воздействия. При $n > 800$ наблюдается «пальцеобразная» неустойчивость Саффмана-Тейлора в результате взаимодействия между плазменным факелом, вызванным взрывом фазы, и образующимся расплавленным слоем. С помощью динамического индентирования установлено немонотонное изменение твёрдости поверхностного слоя АС $\text{Fe}_{53.3}\text{Ni}_{26.5}\text{B}_{20.2}$, модуля упругости и параметра упругого восстановления под индентором по мере увеличения числа импульсов. Лазерная обработка при $f = 2$ Гц, $E = 150$ мДж, $W = 0.6$ Дж/см² в диапазоне $0 < n \leq 500$ перспективна для повышения прочностных качеств, упругости и сохранения ненулевой пластичности АС $\text{Fe}_{53.3}\text{Ni}_{26.5}\text{B}_{20.2}$. Облучение поверхности при $n = 200$ обеспечивает прирост твёрдости и модуля упругости на 8 - 10 %, а при $n = 500$ – на 23 - 25 %.

Путём изменения числа импульсов получены тонкие кристаллические слои на поверхности лент АС $\text{Co}_{70.5}\text{Fe}_{0.5}\text{Cr}_4\text{Si}_7\text{B}_{18}$, двух-, трёхслойные композиты–«сэндвичи» из аморфно-кристаллических составляющих, также полностью объёмные закристаллизованные сплавы. Зависимость микротвёрдости от числа импульсов для данного АС имеет два максимума (при $n = 100$ и $n = 600$). Обсуждается природа такого двухстадийного упрочнения с привлечением структурных методов исследования.

Получены плотно покрытые, полосовые и «шахматные» композитные материалы, представляющие собой аморфную матрицу, армированную кристаллическими областями, сформированные в строго заданных технологических позициях по поверхности и в объёме быстрозакалённых лент АС $\text{Co}_{28.2}\text{Fe}_{38.9}\text{Cr}_{15.4}\text{Si}_{0.3}\text{B}_{17.2}$ за счёт селективного воздействия эксимерного УФ-лазера. Установлено, что чередование в композите в шахматном порядке кристаллических и аморфных зон в соотношении приблизительно 1:5 по объёмной доле, является оптимальным для сочетания высоких значений прочности и удовлетворительной пластичности. Показано, что режим облучения с частотой следования импульсов $2 \text{ Гц} \leq f \leq 20 \text{ Гц}$ (при $n = 100$, $E = 150$ мДж, $W = 0.6$ Дж/см²) улучшает и эффективно поддерживает высокие значения микротвёрдости АС $\text{Co}_{28.2}\text{Fe}_{38.9}\text{Cr}_{15.4}\text{Si}_{0.3}\text{B}_{17.2}$ при сохранении аморфности в структуре.

Список литературы

1. Handbook of laser micro- and nano-engineering. Switzerland: Springer, 2021.
2. Permyakova I.E. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2018. V. 82. No. 9. P. 1086-1095.

Е.Р. БУРМИСТРОВ, Л.П. АВАКЯНЦ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ПАРАМЕТРЫ 2ДЭГ В СВЕТОДИОДНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С ПЯТЬЮ КЯ/КБ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$
ПО ДАННЫМ THz-TDs**

Приведены результаты экспериментов по возбуждению плазмонных осцилляций в образцах гетероструктур со множественными квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ лазерными импульсами длительностью 130 фс в диапазоне температур от 90 до 170 К. Быстрое фурье-преобразование временных форм терагерцовых импульсов позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцового излучения, интерпретация которых дала возможность оценить время релаксации импульса, подвижность и эффективную массу основных носителей заряда.

E.R. BURMISTROV, L.P. AVAKYANTS

Lomonosov Moscow State University

**2DEG PARAMETERS IN LED HETEROSTRUCTURES
WITH FIVE QW/QB $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ ACCORDING TO THz-TDs**

The results of experiments on the excitation of plasmon oscillations in samples of heterostructures with multiple $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ quantum wells by laser pulses with a duration of 130 fs in the temperature range from 90 to 170 K are presented. The fast Fourier transform of the time forms of terahertz pulses made it possible to obtain the frequency spectra of the power and phase shift of terahertz radiation, the interpretation of which made it possible to estimate the pulse relaxation time, the mobility and the effective mass of the main charge carriers.

Гетероструктуры $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ со встроенными пьезоэлектрическими полями используются в качестве источников терагерцового излучения. Они преобразуют ультракороткие оптические импульсы в терагерцовые электромагнитные волны [1].

Мощность и эффективность излучения светодиодов на основе гетероструктур со множественными квантовыми ямами (МКЯ) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ определяются подвижностью и временем релаксации 2ДЭГ. В настоящей работе метод терагерцовой спектроскопии с временным разрешением (THz-TDs) используется для определения времени релаксации квазиимпульса, подвижности и эффективной массы основных

носителей заряда в гетероструктурах с пятью КЯ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$, широко используемых в настоящее время в светодиодах синего и зелёного диапазона излучения.

В результате двухфотонного поглощения лазерных импульсов длительностью 130 фс на длине волны 800 нм в КЯ InGaN возникают пространственно разделённые электроны и дырки. Под действием встроенных пьезоэлектрических полей электронно-дырочная пара становится поляризованной. Это ведёт к генерации в системе осциллирующего во времени дипольного момента $\vec{P}(t)$, который, в свою очередь, приводит к излучению терагерцовых электромагнитных волн. Временные формы терагерцовых импульсов были измерены в диапазоне температур от 90 до 170 К (рис. 1а). С помощью быстрого фурье-преобразования временных форм были получены частотные зависимости фурье-амплитуд терагерцовых импульсов (рис. 1б), моделирование которых позволило получить частотные спектры мощности и фазового сдвига терагерцового излучения. Их интерпретация дала возможность оценить время релаксации импульса ($\sim 10^{-12}$ с), эффективную массу ($m^* = 0.45 m_e$) и подвижность ($\mu = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$) 2ДЭГ. Значение подвижности 2ДЭГ, полученное методом THz-TDS, хорошо согласуется с данными холловских измерений.

При нагреве образцов гетероструктур от 90 до 170 К было обнаружено красное смещение плазмонной резонансной частоты, а также получена немонотонная температурная зависимость эффективной массы ($m^* = 0.43 m_e$ при 90 К и $m^* = 0.56 m_e$ при 170 К).

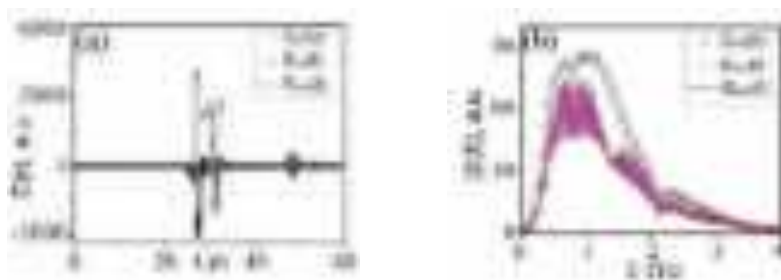


Рис. 1. Временные формы терагерцовых импульсов (а), результат обработки соответствующих временных форм быстрым фурье-преобразованием (б)

Список литературы

1. Sun G., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2011. V. 17. P. 48.

Э.И. БАТТАЛОВА¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

РАЗРАБОТКА ШИРОКОПОЛОСНОГО СВЕТОДИОДА НА ОСНОВЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ГАЛОИДНЫХ ПЕРОВСКИТОВ

Предложена концепция создания широкополосного светодиода на основе неорганических галогидных перовскитов и термоплазмонной метаповерхности. Для реализации концепции синтезированы микрокристаллы неорганических перовскитов CsPbBr₃. Их физико-химические свойства исследованы методами сканирующей зондовой микроскопии и флуоресцентной микроскопии.

E.I. BATTALOVA¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

BROADBAND LIGHT-EMITTING DIODE BASED ON INORGANIC LEAD HALIDE PEROVSKITES

A strategy to develop a broadband light-emitting diode based on inorganic lead halide perovskites and thermoplasmonic metasurface is proposed. For this purpose, CsPbBr₃ microcrystals were synthesized and comprehensively characterized using scanning probe microscopy and fluorescent microscopy.

Неорганические галогидные перовскиты – это семейство материалов с уникальными оптоэлектронными свойствами, одним из которых является высокий квантовый выход фотолюминесценции [1]. В настоящей работе предлагается концепция создания широкополосного светодиода на основе неорганических галогидных перовскитов CsPbBr₃. Идея заключается в генерации нового состояния перовскитов, позволяющего перестраивать длину волны фотолюминесценции в широком диапазоне. Для решения этой задачи используется способ локального фотонагрева с помощью термоплазмонной метаповерхности.

Термоплазмонная метаповерхность представляет собой двумерный массив наноразмерных TiN:Si структур, которые разогреваются под действием падающего света и играют роль локальных тепловых источников (рис. 1а). Температура источников регулируется высотой кремниевого волновода и может изменяться в пределах от нескольких

градусов Цельсия до тысяч градусов Цельсия (рис. 1б). Помещение микрокристаллов перовскитов на такие локализованные источники тепла приведёт к созданию субволновых температурных профилей [2]. Это позволит управлять дисперсией ширины запрещённой зоны перовскитов [3]. При освещении лазерным светом каждый источник тепла может излучать свет с разной длиной волны.

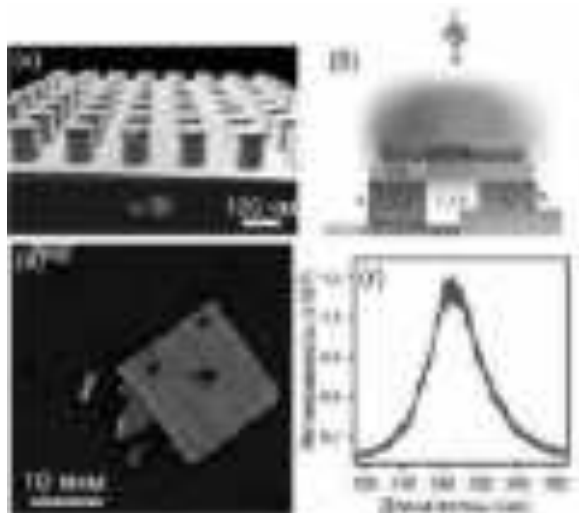


Рис. 1. Термоплазменная метаповерхность (а); схема оптического нагрева микрокристалла CsPbBr₃ (б); оптическое изображение микрокристалла CsPbBr₃ (в); спектр фотолуминесценции CsPbBr₃ (г)

Для реализации предложенной концепции синтезированы микрокристаллы CsPbBr₃ (рис. 1в). При освещении лазерным светом микрокристаллы CsPbBr₃ демонстрируют фотолуминесценцию, спектральный максимум которой соответствует длине волны 525 нм (рис. 1г). Полученные микрокристаллы также охарактеризованы методами времязрешённой флуоресцентной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния и атомно-силовой микроскопии.

Список литературы

1. Akkerman Q.A., Raino G., et al. // Nat. Mat. 2018. V. 17. P. 394.
2. Kharintsev S.S., Kharitonov A.V., et al. // Nanoscale 2022. V. 14. P. 12117.
3. Mannino G., Deretzis I., et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2020. V. 11 (7). P. 2490.

А. ИСМАИЛ^{1,2}, А.Ю. ФЕДОРЕНКО¹, И.О. ОРЕХОВ¹,
С.Г. САЗОНКИН¹, Е.Д. ОБРАЗЦОВА^{2,3}

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

³*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА С ГИБРИДНОЙ СИНХРОНИЗАЦЕЙ МОД

Приведены теоретические и экспериментальные результаты генерации фемтосекундных импульсов в эрбиевом волоконном лазере, работающем в режиме симиларитонов. Ширина спектра излучения ~ 31,5 нм, длительность импульса ~ 300 фс, средняя выходная мощность составляет около 3,7 мВт при энергии импульса 0,376 нДж и пиковой мощности 1,25 кВт, частота повторения импульсов составляет 8,5 МГц, а отношение сигнал-шум – 60 дБ.

A. ISMAEEL^{1,2}, A. Yu. FEDORENKO¹, I.O. OREKHOV¹,
S.G. SAZONKIN¹, E.D. OBRAZTSOVA^{2,3}

¹*Bauman Moscow State Technical University*

²*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny*

³*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

PULSE EVOLUTION OF ER-DOPED FIBER LASER WITH HYBRID MODE-LOCKING

Theoretical and experimental results of the generation of femtosecond pulses in an erbium fiber laser operating in the similariton mode are presented. The emission spectrum width is ~ 31.5 nm, the pulse duration is ~ 300 fs, the average output power is about 3.2 mW at a pulse energy of 0.376 nJ and a peak power of 1.25 kW, the pulse repetition rate is 8.5 MHz, and the signal-to-noise – 60 dB.

Волоконные лазеры с синхронизацией мод зарекомендовали себя как мощный инструмент в различных областях исследований. Режим генерации симиларитонов, получаемый при общей аномальной внутрирезонаторной дисперсии, имеет высокую стабильность и низкий уровень шумовых характеристик [1], что вызывает интерес к исследованию его генерации.

Целью работы является разработка установки эрбиевого волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод (рис. 1). В качестве естественных насыщаемых поглотителей НП используются углеродные нанотрубки, а в качестве искусственных НП используется нелинейная эволюция поляризации (НЭП). Длина резонатора около 26 м и общая внутрирезонаторная дисперсия $\beta_2 = +0,025 \text{ пс}^2$. Также была разработана программная модель на основе нелинейного уравнения Шредингера [2] для расчёта характеристик выходного излучения и моделирования процессов, происходящих в резонаторе данного лазера (эволюция chirpa и длительности импульсов при распространении в компонентах лазера). Результаты теоретического исследования дали понятие влияния chirpa на длительность импульса. Рис. 2 показывает, что излучение лазера выходит из резонатора с положительным chirпом с длительностью 1,5 пс. Чтобы получить более короткую длительность, было принято решение использовать волокно типа SMF-28 с аномальной дисперсией на выходе лазера в качестве компенсатора положительного chirpa. При распространении в 5 м этого компенсатора длительность импульса достигает минимального значения ($\sim 300 \text{ фс}$), как видно на рис. 3.



Рис. 1. Схема лазера



Рис. 2. Эволюция chirpa импульсов, Ф-мгновенная частота

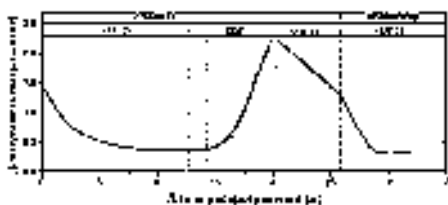


Рис. 3. Эволюция длительности импульса в резонаторе и в компенсаторе

Таким образом, получена генерация фемтосекундных импульсов с желаемыми характеристиками и низким уровнем шума интенсивности.

Список литературы

1. Sazonkin S.G., et al. // *Fibers* 10.10. 2022. V. 88.
2. Donodin A., et al. // *Scientific Reports*. 2020. V. 10(1). P. 1-9.

М. У¹, Д. БИ, М.А. КАРПОВ, А.Д. КУДРЯВЦЕВА,
Т.В. МИРОНОВА, М.В. ТАРЕЕВА, С.Ф. УМАНСКАЯ,
Н.В. ЧЕРНЕГА, М.А ШЕВЧЕНКО

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

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Внутрирезонаторное вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света (ВНКР) зарегистрировано в суспензиях наночастиц различной природы. С помощью ВНКР получена модуляция добротности и синхронизация мод лазерного излучения. Приводится зависимость длительности импульса в режиме модулированной добротности от размера наночастиц.

M. WU¹, D. BI, M.A. KARPOV, A.D. KUDRYAVTSEVA,
T.V. MIRONOVA, M.V. TAREEVA, S.F. UMANSKAYA,
N.V. TCHERNIEGA, A.M. SHEVCHENKO

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Bauman Moscow State Technical University

TEMPORAL CHARACTERISTICS CONTROL OF COHERENT RADIATION USING INTRACAVITY LOW-FREQUENCY RAMAN SCATTERING OF LIGHT

Intracavity stimulated low-frequency Raman scattering in the suspensions of nanoparticles of different nature was registered and, with its help, Q-switching and mode-locking of laser radiation were obtained. The dependence of the pulse duration in Q-switching mode on the nanoparticles size is given.

Использование внутрирезонаторного вынужденного рассеяния различных типов является важным методом для спектроскопических исследований и для многочисленных приложений. Во внутрирезонаторной конфигурации регистрировались и изучались различные виды вынужденного рассеяния [1, 2]. Нами было впервые экспериментально зарегистрировано и исследовано внутрирезонаторное вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света (ВНКР) [3]. ВНКР возникает в результате взаимодействия лазерного излучения с

наноматериалами. Его частотные сдвиги определяются собственными частотами колебаний частиц, лежащими в гига- или терагерцовом диапазоне, и зависят от размера и морфологии частиц.

В настоящей работе мы показали, что с помощью внутриврезонаторного ВНКР можно получить модуляцию добротности и синхронизацию мод лазерного излучения. В качестве образцов использовались водные суспензии монодисперсных наночастиц полистирола размером от 50 нм до 1 мкм и водные суспензии наночастиц алмаза, кварца и золота. При проведении экспериментов на установке (рис. 1) кювета с образцом (6) помещалась внутри резонатора рубинового лазера между задним зеркалом (2) и активным элементом (1). Спектры ВНКР регистрировались с помощью интерферометра Фабри-Перо (10). Временные характеристики излучения регистрировались с помощью скоростного фотодиода (8) и осциллографа (10).

При концентрации наночастиц в суспензии несколько большей, чем необходимая для возбуждения ВНКР, во всех исследованных образцах была получена модуляция добротности. Было показано, что длительность импульса в режиме модуляции добротности увеличивается при увеличении размера наночастиц (рис. 2), что можно объяснить уменьшением поглощения с ростом размера наночастиц.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

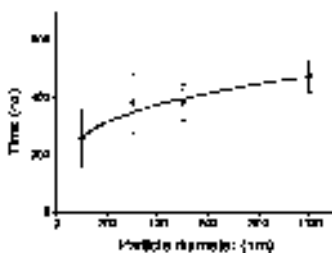


Рис. 2. Зависимость длительности импульса в режиме модуляции добротности от диаметра частиц полистирола

При внутриврезонаторном ВНКР в наночастицах полистирола была зарегистрирована синхронизация мод лазерного излучения.

Список литературы

1. Pohl D. // Phys. Lett. 1867. V. 24A. P. 239.
2. Grasyuk A., Rogul'skii V., Faizulov F. // JETP Lett. 1969. V. 9. P. 6.
3. Shevchenko M.A., et al. // Bull. of the Lebedev Phys. Inst. 2018. V. 45. P. 397.

А.Н. ДАНИЛИН^{1,2}, В.Е. ЛОБАНОВ¹, И.А. БИЛЕНКО^{1,2}

¹*Российский квантовый центр, Сколково*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

МНОГОЧАСТОТНОЕ ЗАТЯГИВАНИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА И ВЫСОКОДОБОТНОГО МИКРОРЕЗОНАТОРА

Проведено экспериментальное исследование возможности реализации эффекта многочастотного затягивания многочастотного лазера высокодобротным интегральным оптическим микрорезонатором с модами типа шепчущей галереи из нитрида кремния. Была показана возможность предсказуемо изменять число и положения линий лазерной генерации.

A.N. DANILIN^{1,2}, V.E. LOBANOV¹, I.A. BILENKO^{1,2}

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo*

²*Lomonosov Moscow State University*

THE EFFECT OF MULTIFREQUENCY SELF-INJECTION LOCKING DUE TO INTERACTION OF A SEMICONDUCTOR LASER AND A HIGH-Q MICROCAVITY

We have performed an experimental study of the multi-frequency self-injection of a multimode laser to a high-quality-factor chip-scaled silicon nitride whispering gallery mode resonator. We have shown that it is possible to deterministically vary the number and positions of the laser generation lines.

Известный в радиофизике и теории колебаний эффект затягивания частоты [1] используется для стабилизации одночастотных лазерных излучателей [2] при помощи высокодобротных микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи (ММШГ) [3]. В недавних работах было показано, что эффект затягивания многочастотного лазера на ММШГ возможно реализовать одновременно на нескольких частотах лазерной генерации [4, 5].

Целью данного исследования является экспериментальное изучение явления многочастотного затягивания многочастотного лазерного излучателя и определение условий возникновения данного явления. Взаимодействие полупроводникового лазера и высокодобротного интегрального микрорезонатора сразу на нескольких резонансных частотах ММШГ позволит создать крайне востребованные ультрастабильные многочастотные лазеры, источники ультрастабильного

терагерцового и микроволнового излучения, системы LIDAR и другие прецизионные приборы.

Для выполнения условия двухчастотного затягивания необходимо соблюсти условие целого числа линий излучения лазерного источника между модами микрорезонатора. Для его выполнения длина лазера, состоящего из отражательного полупроводникового оптического усилителя и зеркала, перестраивалась вдоль оптической оси, что позволяло изменять область свободной дисперсии (ОСД) лазера от 1 до 10 ГГц (рис. 1а). Учитывая условие многочастотной генерации, мы, используя метод спектрограмм и полностью автоматический сбор данных для различных длин резонатора лазера, смогли детерминировано переключать затянутые линии, а также осуществлять одновременное затягивание нескольких линий. Расстояние между затянутыми линиями излучения было равно ОСД микрорезонатора, равной 1 ТГц (рис. 1б).

А.Н. Данилин является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

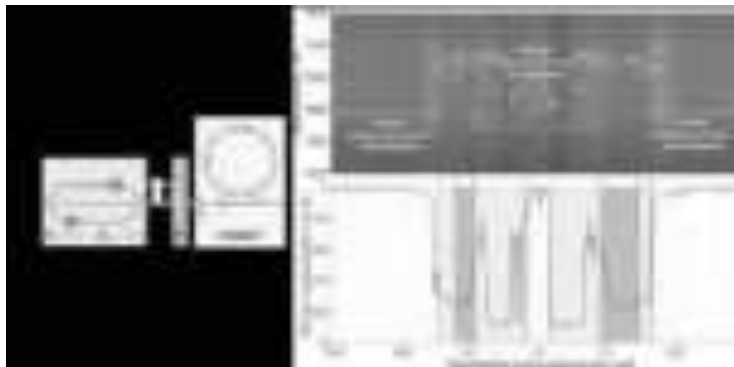


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а); демонстрация детерминированного переключения числа затянутых линий и получения многочастотного затягивания (б)

Список литературы

1. Мигулин В.В. и др. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1978.
2. Kondratiev N.M., et al. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator // Optics Express. 2017. V. 25. No. 23. P. 28167-28178.
3. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
4. Galiev R.R., et al. Spectrum collapse, narrow linewidth, and Bogatov effect in diode lasers locked to high-Q optical microresonators // Optics Express. 2018. V. 26. No. 23. P. 30509-30522.
5. Chen J.J., et al. Multi-wavelength injection locked semiconductor comb laser // Photonics Research. 2022. V. 10. No. 8. P. 1840-1847.

К.А. ЕГОРОВА, К.А. РОЗАНОВ, А.Д. СИДОРОВА,
Ф.А. ГОРЕНСКИЙ, Д.А. СИНЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**УПРАВЛЯЕМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТВЁРДОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ЗА СЧЁТ ЛАЗЕРНОЙ
ОБРАБОТКИ ПОД СЛОЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ
ВЕЩЕСТВ**

Представлены результаты экспериментальных исследований по подбору параметров лазерного излучения для возможности управления механическими и функциональными свойствами титана и стали методом обработки поверхностного под вспомогательным слоем графита, находящегося в сжатых условиях, для создания условия формирования плазмы. Данные работы планируется применить в машиностроении или металлообрабатывающем производстве для увеличения эксплуатационных характеристик изделий.

X.A. EGOROVA, K.A. ROZANOV, A.D. SIDOROVA,
F.A. GORENSKII, D.A. SINEV
ITMO University, Saint-Petersburg

**REGULATED CHANGE IN THE HARDNESS OF METAL
PRODUCTS BY LASER TREATMENT UNDER A LAYER
OF ADDITIONAL SUBSTANCES**

The results of experimental research on the selection of laser treatment parameters for the possibility of regulating the mechanical and functional properties of titanium and steel by surface treatment under an additional layer of graphite in compressed conditions to form a plasma are presented. The result of the work can be applied in mechanical engineering or metalworking to increase the performance characteristics of products.

Функционализация поверхностей, то есть придание поверхности материалов различных заданных свойств, может быть достигнута путём различных методов изменения физико-химических, механических и структурно-фазовых параметров. В настоящее время применяются различные методы для изменения характеристик поверхностного слоя изделия [1, 2].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование формирования на поверхности металлов структур с повышенной твёрдостью, для последующего улучшения параметра износостойкости

изделий. Обработка образцов проводилась с применением импульсного наносекундного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 нм.

В данной работе изучена задача экспериментального исследования зависимости механических свойств (твёрдости и износостойкости) поверхностного слоя при структурировании под слоем графита как от параметров лазерного воздействия (мощность, частота следования импульсов, разрешение записи), так и от габаритов обрабатываемой поверхности.

По результатам ранних исследований была предложена методика обработки с применением вспомогательного покрывного материала, удерживающего графитовый порошок в сжатых условиях для формирования в зоне обработки лазерно-индуцированной микроплазмы [3]. Была продемонстрирована возможность снижения скорости абразивного изнашивания поверхностного слоя титанового образца по сравнению с исходной не менее чем в два раза, за счёт проведения лазерной обработки под слоем графитового порошка.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 (соглашение № 075-11-2021-045 от 24.06.2021, название проекта «Создание высокотехнологичного производства оборудования и технологий для лазерной функционализации поверхности изделий медицинского назначения), и финансовой поддержке научной подготовки бакалавров, магистрантов и аспирантов в рамках выполнения научно-исследовательских работ на базе Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО (конкурс НИР МиА).

Список литературы

1. Chi J., Cai Z., Zhang H., et al. Combining manufacturing of titanium alloy through direct energy deposition and laser shock peening processes // *Materials and Design*. 2021. V. 203. P. 109626.
2. Saleh A.F., Abboud J.H., Benyounis K.Y. Surface carburizing of Ti-6Al-4V alloy by laser melting // *Optics and Lasers in Engineering*. 2010. V. 48. P. 257-267.
3. Вейко В.П., Волков С.А., Заколдаев Р.А. Лазерно-индуцированная микроплазма как инструмент микроструктурирования прозрачных сред // *Квантовая электроника*. 2017. Т. 47. С. 842-848.

Е.Д. МИНАЕВА^{1,2}, А.А. АНТОШИН^{2,3}, Н.В. МИНАЕВ²,
В.И. ЮСУПОВ²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

³*Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова, Москва*

СРАВНЕНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОФИЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ЛАЗЕРНОЙ БИОПЕЧАТИ

В работе представлены результаты сравнения процесса переноса клеточных агрегатов – клеточных сфероидов – с использованием лазерного излучения с различными профилями распределения энергии по сечению пятна. Рассмотрен вариант использования гауссова распределения и распределения, близкого к П-образному. Показано, что использование гауссова распределения энергии из классической реализации метода лазерной биопечати одиночными клетками плохо подходит для переноса крупных клеточных агрегатов. Предложенные негауссовы распределения позволяют организовать пространственный перенос крупного клеточного агрегата в деликатном режиме без термических и иных повреждений.

E.D. MINAEVA^{1,2}, A.A. ANTOSHIN^{2,3}, N.V. MINAEV²,
V.I. YUSUPOV²

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

³*Sechenov First Moscow State Medical University*

COMPARISON OF DIFFERENT LASER ENERGY DISTRIBUTION PROFILES USE FOR THE TASK OF LASER BIOPRINTING

his paper presents results of a comparison of cell aggregates (spheroids) transfer using laser radiation with different energy distribution profiles over the cross section. There were Gaussian distribution and distributions close to П-shape. It is shown, the use of the Gaussian energy distribution from classic single-cell laser bioprinting is not suitable enough for the transfer of large cell aggregates. The proposed non-Gaussian distributions allow to organize the spatial transfer of a large cell aggregate carefully without thermal or other damage.

Тканевая инженерия – современный развивающийся подход по восстановлению повреждённых или утраченных фрагментов биотканей или органов. В рамках такого подхода восстановление можно проводить методами биопечати, используя одиночные клетки или клеточные агрегаты в качестве биочернил. Лазерно-индуцированный прямой перенос (в англоязычной литературе Laser Induced Forward Transfer – LIFT) является видом биопечати, который позволяет проводить пространственный перенос клеточных агрегатов с использованием энергии лазерных импульсов. При оптимальном подборе параметров метод LIFT обладает высоким процентом выживаемости перенесённых клеточных агрегатов. При биопечати единичными клетками методом LIFT используется сфокусированное лазерное излучение с гауссовым профилем энергии. Однако сфокусированное лазерное излучение с относительно большим флюенсом в центральной области может пагубно воздействовать на клеточный сфероид вплоть до его разрушения.

Целью работы являлся поиск оптимального профиля распределения энергии лазерного излучения в рамках реализации процесса лазерной биопечати клеточными сфероидами методом LIFT.

В рамках работы рассмотрены пять вариантов распределения энергии в профиле пучка лазерного излучения: классическое гауссово распределение с перетяжкой $w_0 = 15$ мкм, гауссово распределение, перетяжка которого адаптирована под размер сфероида $w_0 = 120$ мкм, расширенное гауссово распределение, перетяжка которого от 3 до 10 раз превышает линейный размер сфероида $w_0 \sim 1000$ мкм. Также рассмотрены распределения, близкие к П-образному, с рабочими радиусами $r_1 = 125$ мкм и $r_2 = 183$ мкм. Сравнение проводилось по параметрам флюенса лазерного пучка.

Показано, что в случае классического и адаптированного гауссова распределения воздействие характеризуется высоким градиентом давления и дополнительно оказывает пагубное термическое воздействие на сфероид. Использование расширенного гауссова распределения позволяет перенести сфероид, но с ощутимой потерей разрешающей способности. Использование пространственного распределения энергии, близкого к П-образному позволяет обеспечивает «деликатный» режим переноса.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части развития лазерных аддитивных технологий.

Д.В. САЧЕНКО
АО «ЛЛС», Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА, ПРОИЗВОДСТВО И СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЛАЗЕРОВ И ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ

Представлены разработанные лазерные системы и компоненты, которые входят в состав стандартной продукции компании NordLase (Россия), а также возможности компании в сфере новых разработок, лазерных стенов и пример реализованных проектов с точки зрения подхода к проектированию, так и опыт проработки технологий взаимодействия лазерного излучения с веществом.

D.V. SACHENKO
JSC «LLS, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT, PRODUCTION AND SERVICE OF LASERS AND LASER EQUIPMENT

The paper presents the developed laser systems and components that are part of the standard products of the NordLase company (Russia), as well as the company's capabilities in the field of new developments, laser stands and an example of completed projects in terms of the design approach, as well as experience in developing laser technologies.

В работе представлены разработанные лазерные системы и компоненты, которые входят в состав стандартной продукции компании NordLase (Россия). Рассмотрены возможности компании в сфере новых разработок, лазерных стенов и пример реализованных проектов с точки зрения подхода к проектированию, так и опыт проработки технологий взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Р. ДРАМПЯН, В.А. ПАРФЕНОВ¹

Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения
¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ЛАЗЕРНАЯ РЕСТАВРАЦИОННАЯ ОЧИСТКА ИСТОРИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ

Приведён краткий обзор применений технологии лазерной очистки для удаления загрязнений различной природы в процессе реставрации объектов культурного наследия. Обсуждается важность корректного выбора выходных характеристик лазеров и их влияние на теплофизические процессы лазерной абляции. Показана определяющая роль длительности импульса лазерного излучения при удалении загрязняющих веществ с поверхности памятников из камня в результате фототермической абляции.

R. DRAMPYAN, V.A. PARFENOV¹

Institute for Physical Research of the National Academy of Sciences of Armenia, Ashtarak
¹Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

LASER RESTORATION CLEANING OF HISTORICAL MONUMENTS

A brief overview of the applications of laser cleaning technology for removing contaminants of various nature in the restoration of cultural heritage objects is given. The importance of the correct choice of output characteristics of lasers and their influence on the thermophysical processes of laser ablation is discussed. The determining role of the pulse duration of laser radiation in the removal of pollutants from the surface of stone monuments as a result of photothermal ablation is shown.

В последние годы лазерные технологии находят всё более широкое применение в сохранении культурного наследия. Одним из основных применений лазеров в этой области является реставрационная очистка памятников от загрязнений природного и антропогенного происхождения. По сравнению с традиционными методами, используемыми в реставрации, технология лазерной очистки имеет ряд важных преимуществ, таких как высокая эффективность, точность и скорость удаления загрязнений [1]. Однако для эффективного и безопасного применения лазеров необходим очень тщательный выбор их выходных характеристик, которые могут значительно варьироваться в зависимости от вида загрязнений и материала самого памятника.

В данной работе проводилось исследование влияния длительности лазерного импульса на процессы абляции при удалении загрязнений с поверхности памятников из камня. Проблема риска повреждения очищаемой поверхности наиболее критична именно для каменных материалов, поскольку их механическая прочность значительно ниже, чем у металлов. Специфика физических процессов, происходящих при лазерной абляции каменных поверхностей, рассмотрена в ряде работ [1, 2], которые показали возможность реализации разных физических механизмов лазерной очистки в зависимости от длительности импульса.

Нами были проведены эксперименты по очистке поверхности модельных образцов из известняка при помощи Nd:YAG лазера со следующими выходными характеристиками: длина волны – 1,064 мкм, длительность импульса – 8 нс, частота повторения импульсов – 10 Гц. Энергия импульса варьировалась в диапазоне 50 - 350 мДж. Излучение лазера фокусировалось на поверхность образца из известняка с искусственным загрязнением, имитирующим чёрную гипсовую корку. Такого рода загрязнения являются типичными для большинства памятников из карбонатных горных пород, экспонируемых на открытом воздухе. Лазерный пучок направлялся на поверхность образцов сквозь тонкую стеклянную пластинку (расстояние между образцом и пластинкой – 10 мм), на которой оседали частицы «корки», удалённые в результате процесса абляции. После этого поверхность стекла, обращённая к модельному образцу, анализировалась при помощи сканирующего электронного микроскопа. Было выявлено, что при значениях плотности энергии излучения в диапазоне 6 - 120 6,2 Дж/см² происходило удаление коркового слоя загрязняющего вещества, причём, как его отдельных частиц, так и их крупных конгломератов. Это говорит о том, что при указанных выходных параметрах лазера реализуется испарительный режим абляции, сопровождаемый значительным по силе термическим «взрывом», приводящим к выбросу загрязняющего вещества. Поскольку это может приводить к механическим повреждениям очищаемой подложки, можно сделать вывод о том, что применение Nd:YAG лазеров с наносекундной длительностью импульсов для удаления загрязнений в результате фототермической абляции представляет опасность для состояния сохранности каменных поверхностей. Для уменьшения риска повреждений памятников из известняка и мрамора целесообразно использование микросекундных импульсов.

Список литературы

1. Cooper M. Laser cleaning in conservation. Oxford: Butterworth-Heinemann. 1998.
2. Pini R., Siano S., Salimbeni R. Laser cleaning of stones: optimizing the laser parameters and treatment methodology // Proc. SPIE. 2001. V. 4402. P. 32-37.

В.С. ЖИГАРЬКОВ¹, Э.В. ГРОСФЕЛЬД^{1,2}, А.И. АЛЕКСАНДРОВ²,
Н.В. МИНАЕВ¹, В.И. ЮСУПОВ¹

¹*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

²*Федеральный исследовательский центр
«Фундаментальные основы биотехнологии» РАН, Москва*

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ БИОПЕЧАТИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНОСТЬ КЛЕТОК

Лазерно-индуцированный прямой перенос (LIFT) является распространённым методом биопечати с использованием клеток, встроенных в гель. Однако мало что известно о стрессах, которые испытывают клетки во время лазерной биопечати. Теоретически и экспериментально исследованы уровни лазерного импульсного облучения и импульсного нагрева.

V.S. ZHIGARKOV¹, E.V. GROSFELD^{1,2}, A.I. ALEXANDROV²,
N.V. MINAEV¹, V.I. YUSUPOV¹

¹*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

²*Federal Research Centre «Fundamentals of Biotechnology» of the RAS, Moscow*

EFFECT OF LASER BIOPRINTING ON CELL FUNCTIONALITY

Laser-induced forward transfer (LIFT) is a useful technique for bioprinting using gel-embedded cells. However, little is known about the stresses experienced by cells during LIFT. This report theoretically and experimentally explores the levels of laser pulse irradiation and pulsed heating experienced.

В настоящее время на основе лазерно-индуцированного прямого переноса вещества LIFT (Laser-Induced Forward Transfer) [1] получила широкое развитие технология лазерной биопечати [2] для переноса в гелевых каплях на приёмные среды различных биологических материалов, например, клеток млекопитающих [3], микробов [4].

Лазерная биопечать обладает целым рядом неоспоримых преимуществ, заключающихся в частоте лазерных импульсов, обеспечивающих высокую скорость печати, точности и стабильности переноса [5]. Однако, несмотря на это, существуют ограничения, ограничивающий возможности биопечати [6 - 8].

Цель работы состоит в исследовании эффектов лазерной биопечати с использованием метода проточной цитофлуориметрии [9]. Произведены расчёты доз энергии и импульсного температурного нагрева, которым подвергаются клетки. Оценены эффекты прямого импульсного лазерного облучения и импульсный нагрев клеток. В качестве биологического объекта выбраны дрожжевые клетки *Saccharomyces cerevisiae*, являющиеся одним из самых распространённых эукариотических модельных объектов в биологии, что обусловлено их высокой скоростью роста, полностью секвенированным геномом и разработанными методиками для эффективной геномной инженерии

Экспериментально установлено, что клетки в слое геля испытывают воздействие лазерного излучения с плотностью энергии 0.1 - 6 Дж/см². При этом показано, что такой уровень облучения сам по себе не влияет на жизнеспособность дрожжей. Модельными экспериментами выявлено, что только 5 % клеток в гелевом слое, примыкающем к поглощающей плёнке, нагреваются до высоких температур, что подтверждается гибелью соответствующей популяции клеток при биопечати. Это сопровождалось эффектом почти полного затемнения внутриклеточного зелёного флуоресцентного белка, также наблюдаемого в ответ на тепловой шок. Обнаружен не наблюдавшийся ранее эффект значительного увеличения проницаемости мембран у перенесённых живых клеток.

Полученные данные дают более широкое представление о влиянии лазерной биопечати на живые клетки и могут предложить новое направление исследований, связанное с изменением проницаемости клеточных мембран.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части доработки экспериментальной системы, гранта РНФ 20-14-00286 в части оптимизации процесса лазерной биопечати.

Список литературы

1. Bohandy J., et al. // Appl. Phys. 1986. V. 60. No. 4. P. 1538-1539.
2. Serra P., et al. // Adv. Mater. Technol. 2019. V. 4. No. 1. P. 1-33.
3. Derakhshanfar S., et al. // Bioact. Mater. 2018. V. 3. No. 2. P. 144-156.
4. Saygili E., et al. // Bioprinting. Elsevier B.V. 2020. V. 18. P. e00071.
5. Yusupov V., et al. // Int. J. Bioprinting. 2020. V. 6. No. 3. P. 1-16.
6. Zarubin V.P., et al. // Quantum Elec. 2019. V. 49. No. 11. P. 1068.
7. Zhigarkov V.P., et al. // Nanomaterials. 2021. V. 11. No. 10. P. 2584.
8. Mareev E., et al. // Photonics. 2021. V. 8. No. 9. P. 374.
9. Grosfeld E.V. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23. No. 17. P. 9823.

Л.Н. БОРОДИНА, А.В. ВЕНИАМИНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ФОТОИНДУЦИРОВАННОЕ ИЗМЕНЕНИЕ
КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ
ЛЮМИНЕСЦИРУЮЩИХ НАНОКРИСТАЛЛОВ
В ЛАЗЕРНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ МИКРОСКОПИИ**

Показано, что при исследовании диффузии методом восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания неоднородность интенсивности люминесценции может возникать из-за изменения не только её квантового выхода, но и коэффициента диффузии. Смоделированы профили люминесценции, возникающие при различных комбинациях увеличения и уменьшения квантового выхода и коэффициента диффузии в результате воздействия лазерного излучения. Приведён пример эксперимента с квантовыми точками, в котором проявляется изменение их коэффициента диффузии.

L.N. BORODINA, A.V. VENIAMINOV
ITMO University, Saint-Petersburg

**PHOTOINDUCED CHANGE IN DIFFUSIVITY
OF LUMINESCENT NANOCRYSTALS
IN LASER SCANNING MICROSCOPY**

We show that a luminescence inhomogeneity may arise in Fluorescence Recovery After Photobleaching diffusion experiment due to photoinduced changes not only in luminescence quantum yield but also in the diffusion coefficient. Luminescence profiles corresponding to various combinations of photoinduced increase or decrease in quantum yield and diffusion coefficient are simulated. An exemplary experimental result is presented that manifests changing diffusivity of quantum dots.

Используемый нами метод изучения дрейфа и диффузии люминесцирующих наночастиц в коллоидных растворах и определения их гидродинамических размеров связан с методом восстановления флуоресценции после фотообесцвечивания (Fluorescence Recovery After Photobleaching, FRAP) [1].

Метод реализован на базе лазерного сканирующего микроскопа: в ходе эксперимента в узкой полоске раствора люминесцирующих частиц под действием лазерного луча изменяется квантовый выход их фотолюминесценции (ФЛ); из-за диффузии частиц полоса с изменённой

интенсивностью ФЛ расширяется, поперечное сечение её приобретает гауссов профиль [2], по скорости изменения ширины которого можно определить коэффициент диффузии и рассчитать гидродинамический радиус частиц.

Интересно, что неоднородность пространственного распределения ФЛ, используемая для исследования диффузии, может быть получена и без фотоиндуцированного изменения квантового выхода ФЛ (обесцвечивания), казалось бы, составляющего основу метода FRAP. Это возможно, если экспозиция приводит к изменению коэффициента диффузии нанокристаллов. В этом случае пространственная неоднородность ФЛ не появляется сразу после экспонирования, а развивается с течением времени. Поперечный профиль ФЛ в таком случае описывается разностью двух функций Гаусса.

Ситуация, при которой под действием света изменяются и квантовый выход ФЛ, и коэффициент диффузии, более реалистична и действительно наблюдалась в наших экспериментах. Примеры моделирования и результаты эксперимента, иллюстрирующие эту ситуацию, приведены на рис. 1 и 2.

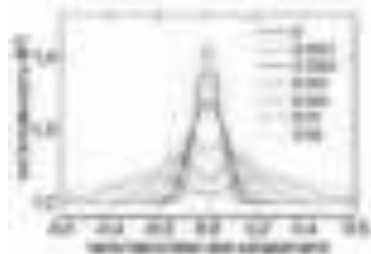


Рис. 1. Последовательность профилей ФЛ в различные моменты времени (легенда – в условных единицах) после увеличения квантового выхода ФЛ и коэффициента диффузии в результате экспонирования

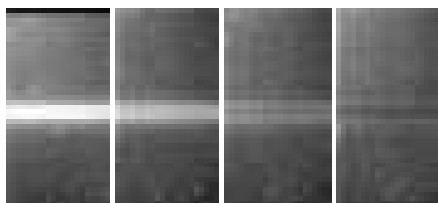


Рис. 2. Картины ФЛ коллоидного раствора квантовых точек через 3, 5, 13, 19 с после экспонирования его горизонтальной полосе сфокусированным лазерным пучком; видны две расходящиеся со временем яркие полосы и тёмная полоса в середине

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, госзадание № 2019-1080, и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Braeckmans K., et al. // Biophysical Journal. 2007. V. 92 (6). P. 2172.
2. Crank J. The mathematics of diffusion. Oxford University Press, 1979.

М. САЛХАБ, Ч.Л.Б. РАЙАСЕКАРА, О.С. ВАСИЛЬЕВ¹,
О.Н. КАРПОВ, В.А. ПАРФЕНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

¹ООО «Лазерный центр», Санкт-Петербург

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ЦВЕТА ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Приведены результаты экспериментов по лазерной обработке поверхности углеродистой стали. На поверхности металла были получены оксидные плёнки различных цветовых оттенков с целью решения одной из актуальных задач современной музейной работы – восстановления воронения на поверхности предметов декоративно-прикладного искусства из стали. Продемонстрирована возможность удаления искусственно индуцированной атмосферной коррозии при помощи лазерной очистки и повторного получения исходного цветового оттенка при помощи повторной лазерной обработки.

M. SALHAB, C.L.B. RAJASEKARA, O.S. VASILIEV¹,
O.N. KARPOV, V.A. PARFENOV

Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

¹Laser Center Ltd., Saint-Petersburg

LASER TREATMENT FOR RESTORING ORIGINAL COLOR OF DECORATIVE CARBON STEEL-BASED ARTWORKS

Presents the results of experiments on the laser surface treatment of carbon steel. Oxide films of various color shades were obtained on the metal surface in order to solve one of the urgent tasks of modern museum work - the restoration of "bluing" on the surface of objects of decorative and applied art made of steel. The possibility of removing artificially induced atmospheric corrosion by laser cleaning and reobtaining the original color shade by repeated laser treatment is demonstrated.

Одной из сложнейших задач современной музейной работы является восстановление так называемого воронения. Воронением называют декоративную отделку предметов из железа и стали, которая имеет различные цветовые оттенки (синего, жёлтого и некоторых других цветов). В результате воздействия окружающей среды, в первую очередь, из-за коррозии воронение может быть повреждено и даже полностью

утрачено. Проржавевшие слои должны быть удалены, после чего необходимо точно восстановить первоначальный цвет изделия. В своей работе реставраторы обычно применяют химические и механические методы, но такая обработка зачастую приводит к повреждению поверхности памятников, что недопустимо. Обработка лазером потенциально может быть альтернативной традиционным методам реставрации. В настоящее время лазеры уже используются в реставрационной практике. Но обычно их применяют для удаления всевозможных природных и антропогенных загрязнений. Лазерная очистка — это бесконтактный метод обработки поверхности памятников, который в случае железо-содержащих предметов позволяет удалять коррозию и при этом обеспечивает высокую степень сохранности обрабатываемой поверхности [1, 2]. В данной работе впервые исследована возможность применения лазерной обработки для восстановления воронения. В экспериментах мы использовали импульсный иттербиевый волоконный лазер ($\lambda = 1064$ нм, $\tau = 1 - 120$ нс, $f = 2 - 1000$ кГц, мощность до 50 Вт). В ходе работы на поверхности модельных образцов из углеродистой стали было получено множество цветных оксидных слоёв. Полученная таким образом цветная декоративная отделка была принудительно повреждена в результате её обработки раствором соляной кислоты (HCl), что имитировало процесс повреждения воронения в результате атмосферной коррозии. В результате были получены различные степени повреждения цветных участков. После этого проводилась повторная лазерная обработка модельных образцов. Очистка и полировка корродированной поверхности при помощи лазеров привела к уменьшению её шероховатости. После этого проводился ещё один этап лазерной обработки с целью получения исходного цветового оттенка на поверхности образцов. При этом текстура поверхности и её цвет были очень близки к исходным характеристикам образцов.

Полученные экспериментальные результаты являются предварительными, но они позволяют сделать вывод о том, что лазерная обработка является перспективным способом восстановления декоративной отделки памятников истории и железа и стали.

Список литературы

1. Cooper M. Laser cleaning in conservation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
2. Парфенов В.А. Лазерная очистка памятников истории и культуры. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.

И.П. ТАРАСОВ, Л.Н. БОРОДИНА, С.А. ИВАНОВ,
А.С. ЛИПАТЬЕВ¹, В.Н. СИГАЕВ¹, Н.В. НИКОНОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ЗАПИСЬ ЛИНЕЙНЫХ МИКРОСТРУКТУР В ОБЪЁМЕ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Приведены результаты эксперимента по записи линейных микроструктур в фототермоорефрактивном стекле с помощью ультракоротких лазерных импульсов, исследована люминесценция образцов после лазерной и термической обработки.

I.P. TARASOV, L.N. BORODINA, S.A. IVANOV,
A.S. LIPATIEV¹, V.N. SIGAEV¹, N.V. NIKONOROV

ITMO University, Saint-Petersburg

¹Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

FEMTOSECOND LASER FABRICATION OF LINEAR MICROSTRUCTURES IN A PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS BY ULTRASHORT LASER PULSES

The article is devoted to results of inscription linear microstructures in photo-thermo-refractive (PTR) glass by ultrashort laser pulses. Luminescence and heat treatment research of the PRT samples with different composition after ultrashort laser radiation.

Фототермоорефрактивное (ФТР) отличается устойчивостью к воздействию окружающей среды, механической и термической прочностью, высоким порогом лазерного повреждения, а также долговечностью. Благодаря этим свойствам материал нашёл широкое применение в голографии, где методом записи объёмных фазовых голограмм является УФ-облучение с последующей термической обработкой. С появлением лазеров с ультракороткими импульсами открылись новые технологии записи информации, благодаря чему становится возможным расширить области применения ФТР-стекла. Однако технологии фемтосекундной записи для создания объёмных микроструктур в ФТР-стекле являются малоизученными, поскольку получаемые модификации сильно зависят от лазерной системы, выбранных режимов работы, фокусирующей оптики и являются уникальными [1].

Целью работы является экспериментальное исследование технологий записи объёмных микроструктур в ФТР-стекле под действием ультракоротких лазерных импульсов. В работе исследовались образцы на основе системы $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF}$ с добавками Ag_2O , CeO_2 , Sb_2O_3 и без добавки CeO_2 . Для записи микроструктур использовался фемтосекундный лазер ($E = 100 - 1200$ нДж, 1030 нм, 180 фс). В качестве фокусирующей оптики микрообъектив с числовой апертурой $NA = 0.45$. Люминесцентные изображения и локальные спектры люминесценции получены с помощью лазерного сканирующего микроскопа Zeiss LSM710, входящий в состав ЦКП «Нанотехнологии» Университета ИТМО.

В образцах были записаны серии линейных микроструктур (треков) с варьированием параметров лазера и скорости сканирования. На рис. 1 показано люминесцентное изображение записанных треков. Люминесценция в диапазоне 510 - 530 нм может свидетельствовать об образовании нейтральных молекулярных кластеров Ag_3 , Ag_4 [2] и структурных изменениях в SiO_2 [3], её спектр представлен на рис. 2. Исследовано влияние термической обработки при 400°C , подтверждающее способность ФТР-стекла сохранять записанные треки после фемтосекундной и термической обработок. Полученные результаты будут использованы для дальнейшей отработки технологий записи информации в ФТР-стекле.

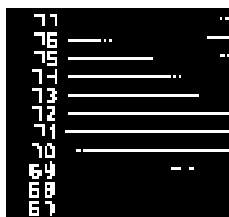


Рис. 1. Фотография записанных треков

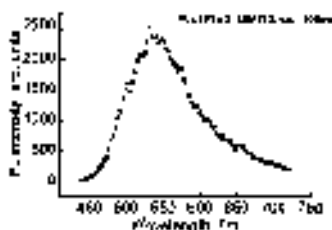


Рис. 2. Спектр люминесценции до термической обработки

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО и Минобрнауки РФ, госзадание № 2019-1080.

Список литературы

1. Zhang Y.J., et al. // Optical Materials Express. 2017. V. 7 (7). P. 2626-2635.
2. Ignatiev A.I., et al. // Opt. Spectrosc. 2013. V. 114. P. 769-774.
3. Little D.J., et al. // Optics Express. 2008. V. 16 (24). P. 20029-20037.

А.А. БУРЦЕВ, В.В. ИОНИН, А.В. КИСЕЛЕВ, Н.Н. ЕЛИСЕЕВ,
В.А. МИХАЛЕВСКИЙ, А.А. НЕВЗОРОВ, А.А. ЛОТИН

*Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН – филиал
ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Шатура*

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ФАЗОИЗМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе представлены исследования оптического переключения электрической проводимости тонких плёнок фазоизменяемых материалов GeTe и Ge₂Sb₂Te₅. Показаны пороговые значения плотности энергии для осуществления фазовых переходов при разной длительности импульсов. Анализируется временная динамика изменения электрофизических свойств.

A.A. BURTSEV, V.V. IONIN, A.V. KISELEV, N.N. ELISEEV,
V.A. MIKHALEVSKY, A.A. NEVZOROV, A.A. LOTIN

*Institute on Laser and Information Technologies – branch of FSRC «Crystallography
and Photonics» of the RAS, Shatura*

CONDUCTIVITY SWITCHING OF PHASE-CHANGE MATERIALS INDUCED BY PULSED LASER RADIATION

Presents the results of optical switching of the GeTe and GST thin film conductivity. We demonstrate the transition threshold pulse energy for different duration of laser pulse. We have analyzed the electrical properties time-dynamics.

Оптоэлектронные нейроморфные устройства используют преимущества как высокой плотности электронных схем, так и высокой пропускной способности их оптических аналогов, тем самым демонстрируя потенциал для создания систем искусственного интеллекта малой мощности. Несмотря на достигнутые успехи, все существующие технологии обработки информации по-прежнему опираются на архитектуру фон Неймана и, следовательно, страдают от присущих ей узких мест в энергопотреблении; данные должны постоянно передаваться между физически разделёнными модулями памяти и арифметико-логическим устройством, на что приходится затрачивать энергию и время. Для дальнейшего улучшения энергопотребления, функциональности, занимаемой площади и скорости связи систем искусственного интеллекта необходим совершенно другой подход.

Фазоизменяемые материалы (ФИМ) – идеальные кандидаты для полностью оптических устройств хранения и обработки информации. Они уже были предметом интенсивных исследований и разработок в течение последнего десятилетия, но в контексте электронных модулей памяти и оптических дисков высокой плотности записи. Яркой и функциональной особенностью этих материалов является высокий контраст между кристаллической и аморфной фазами как по их электрическим, так и по оптическим свойствам. В частности, ФИМ на основе халькогенидов обладают способностью переключаться между этими двумя состояниями в ответ на соответствующие тепловые воздействия (кристаллизация) или процессы стеклования расплава (аморфизация). Ячейка на основе тонких плёнок халькогенидов может хранить несколько состояний, которые соответствуют разному соотношению аморфной и кристаллической фаз. Ячейки многоуровневых состояний обладают рядом принципиальных свойств, таких как предпороговый режим накопления энергии, пороговое значение энергии перехода и нелинейное поведение при переключении состояний, что позволяет рассматривать их работу как аналог биологического нейрона.

Целью настоящей работы является исследование обратимых фазовых переходов (в том числе и определение их времен) в тонких плёнках GeTe и Ge₂Sb₂Te₅, индуцированных импульсным лазерным излучением лазера различной длительности. Динамические характеристики изменения сопротивления образцов, связанных с фазовыми переходами, измерялись в схеме деления напряжения с использованием опорного сопротивления и постоянного напряжения. Используя возможность ступенчато изменять проводимость устройства, можно создать оптоэлектронные архитектуры (мемристоры) следующего поколения.

Список литературы

1. Chai Z., Hu X., Wang F., et al. // Adv. Opt. Mater. 2017. V. 5. No. 7. P. 1600665.
2. Zhang W., Mazzarello R., Wuttig M., et al. // Nat. Rev. Mater. 2019. V. 4. P. 150-168.
3. Ovshinsky S.R. // Jpn. J. Appl. Phys. 2004. V. 43. P. 4695.
4. Kuzum D., Jeyasingh R.G., Lee B., et al. // Nano. Lett. 2012. V. 12. P. 2179-2186.
5. Han S-T., Zhou Y. Photo-electroactive non-volatile memories for data storage and neuromorphic computing. Woodhead Publishing. 2020.
6. Lu H., Thelander E., Gerlach J.W., et al. // Adv. Funct. Mater. 2013. V. 23. No. 29. P. 3621-3627.
7. Kiselev A.V., Ionin V.V., Burtsev A.A., et al. // Optics & Laser Technology. 2022. V. 147. P. 107701.

В.Р. ГРЕСЬКО, В.В. СМИРНОВА, Д.В. СЕННИКОВА,
М.М. СЕРГЕЕВ, А.Д. ДОЛГОПОЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФЕМТОСЕКУНДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ZnO:Ag ТОНКИХ ПЛЁНОК

В работе исследовано влияние параметров фемтосекундного лазерного излучения на свойства тонких ZnO плёнок с наночастицами серебра. Показано изменение параметров наночастиц и полупроводниковой матрицы, изменение проводимости и спектральных характеристик материала. Показано формирование лазерно-индуцированных периодических структур.

V.R. GRESKO, V.V. SMIRNOVA, D.V. SENNIKOVA,
M.M. SERGEEV, A.D. DOLGOPOLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

FEMTOSECOND LASER MODIFICATION OF ZnO:Ag PROPERTIES OF THIN FILMS

In this work, the influence of the parameters of femtosecond laser radiation on the properties of thin ZnO films with silver nanoparticles is studied. A change in the parameters of nanoparticles and a semiconductor matrix, a change in the conductivity and spectral characteristics of the material are shown. The formation of laser-induced periodic structures is shown.

Тонкие плёнки ZnO благодаря своим физическим свойствам часто используются в качестве фоточувствительных элементов и слоёв различных оптоэлектронных устройств, в том числе фотодетекторов [1]. Добавление в состав плёнок наночастиц серебра позволяет значительно повысить чувствительность сенсоров в определённом спектральном диапазоне длин волн за счёт явления локализованного плазмонного резонанса, а также повысить проводимость материала [2]. Лазерное излучение является очень удобным инструментом для быстрого, высокоэффективного и в то же время легко реализуемого метода локальной модификации свойств плёнок с возможностью их коррекции в режиме реального времени. Подбирая длину волны излучения, можно воздействовать на саму матрицу ZnO или находящиеся в ней наночастицы металлов. Благодаря этому можно наблюдать различные механизмы лазерного воздействия, а также свойства модифицированного материала.

Для лазерной модификации структуры плёнки ZnO с наночастицами серебра использовалось импульсное фемтосекундное излучение с длиной волны 1030 нм. Поверхность образцов была обработана при различных значениях скорости сканирования, мощности излучения и частоты следования импульсов. Исследованы оптические и электрические характеристики плёнок. Наблюдалось изменение положения пика плазмонного резонанса, а также изменение электропроводности материала. При частотах выше 100 кГц на поверхности образцов формировались периодические структуры (рис. 1).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10208).



Рис. 1. Микрофотография трека, записанного на ZnO:Ag

Список литературы

1. Ahmed A.A. et al. //Ceramics International. 2022. V. 48. No. 11. P. 16142-16155.
2. Tzeng S.K., Hon M.H., Leu C. // Journal of the Electrochemical Society. 2012. V. 159 (4). P. H440.

Д.И. ЯКУБОВСКИЙ, А.В. АРСЕНИН, Д.В. ГРУДИНИН,
М.С. МИРОНОВ, В.С. ВОЛКОВ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ УЛЬТРАТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНОК

Ультратонкие сплошные металлические плёнки толщиной менее 10 нм являются неотъемлемой частью устройств прозрачной электроники и оптоэлектроники. Характеризация оптических свойств таких плёнок требует использования высокочувствительных измерительных методов, таких как эллипсометрия и ближнепольная оптическая микроскопия. В работе представлена методика локальной характеристики оптических свойств ультратонких плёнок золота различной толщины, полученных на двумерном MoS₂.

D.I. YAKUBOVSKY, A.V. ARSENIN, D.V. GRUDININ,
M.S. MIRONOV, V.S. VOLKOV

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

NEAR-FIELD OPTICAL MICROSCOPY FOR CHARACTERIZATION OF ULTRA-THIN METAL FILMS

Ultrathin continuous metal films less than 10 nm thick are an essential part of transparent electronics and optoelectronics devices. The characterization of the optical properties of such films requires the use of highly sensitive measuring techniques such as spectroscopic ellipsometry and near-field optical microscopy. In this work, we propose a method for local characterization of the optical properties of ultrathin gold films of various thicknesses obtained on two-dimensional MoS₂.

Ультратонкие металлические плёнки толщиной менее 10 нм являются важным элементом гибкой и прозрачной оптоэлектроники, плазмоники и нанофотоники. Характеристики устройств, в которых используются прозрачные электроды на основе плёнок, их оптические и электрические свойства определяются морфологией (шероховатостью и сплошностью плёнки) [1, 2]. Ранее было продемонстрировано, что использование адгезионных слоёв на основе дисульфида молибдена (MoS₂) позволяет получить сплошные ультратонкие плёнки с высокой проводимостью и плазмонным откликом [3]. Исследование локального оптического отклика

тонких плёнок, а также эффектов возбуждения и распространения поверхностных волн в них возможно при помощи метода сканирующей ближнепольной оптической микроскопии (СБОМ) [4, 5]. В настоящей работе изучен сигнал отражения СБОМ в плёнках золота, полученных на монослоях MoS_2 , в диапазоне толщин 2 - 10 нм, а также зависимость величины сигнала СБОМ от морфологии плёнок.

В работе плёнки золота были получены методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме на поверхности $\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{Si}$. Морфология и толщина осаждённых плёнок изучена с помощью атомно силовой (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Результаты СБОМ для плёнки золота толщиной ~ 4 нм на рис. 1а демонстрируют заметно большую интенсивность отражённого сигнала СБОМ на участке Au-MoS_2 (золото на MoS_2), по сравнению с Au-SiO_2 , что связано с различием в морфологии плёнок, о чём свидетельствуют данные АСМ-топографии и СЭМ на рис. 1б. Также, получена зависимость интенсивности СБОМ от толщины плёнок, отражающая корреляцию оптического отклика с морфологией и толщиной золота, представленная на рис. 1в.

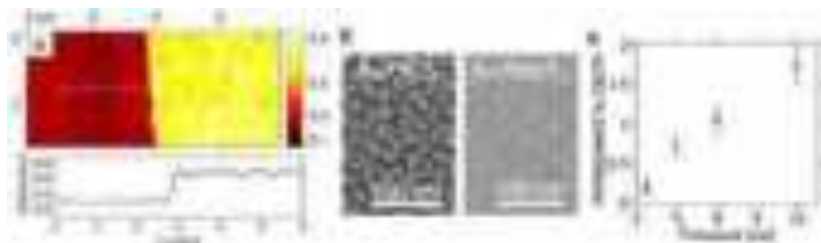


Рис. 1. Карта интенсивности СБОМ, полученная для плёнки золота толщиной 4 нм на участке $\text{Au/SiO}_2 - \text{Au/MoS}_2$, с соответствующим профилем сигнала (а); изображения СЭМ плёнки золота толщиной 4 нм, осаждённой на поверхность SiO_2 и MoS_2 (б); зависимость среднего значения интенсивности сигнала СБОМ на участке Au/MoS_2 от толщины плёнки золота (в)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 21-72-10163).

Список литературы

1. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et al. // *Nanomaterials*. 2018. V. 8. P. 1058.
2. Volkov V.S., Yakubovsky D.I., et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2018. V. 1092. P. 012161.
3. Yakubovsky D.I., Stebunov Yu.V., et al. // *Adv. Mater. Interfaces*. 2019. P. 190019.
4. Yakubovsky D.I., Arsenin A.V. et al. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. V. 1461. P. 012193.
5. Mastel S., Govyadinov A.A., Maissen C., et al. // *ACS Photonics*. 2018. V. 5. P. 3372-3378.

Д.А. МУРАТОВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ ЗОЛОТЫЕ ЧАСТИЦЫ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Проведено исследование спектральных свойств композитной среды на основе диоксида титана, содержащей золотые частицы эллипсоидальной формы. Получены спектры отражения, пропускания и поглощения данной структуры при разных углах падения излучения и разной геометрии эллипсоидов. Проведено сравнение результатов исследований со спектральными характеристиками композитной среды с частицами сферической формы.

D.A. MURATOV, N.E. NIKOLAEV, T.K. CHEKHOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

OPTICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MEDIA CONTAINING GOLD PARTICLES OF DIFFERENT SHAPES

A study of the spectral properties of a composite medium based on titanium dioxide containing ellipsoidal gold particles was carried out. The reflection, transmission, and absorption spectra of this structure are obtained at different radiation incidence angles and different geometry of ellipsoids. The dependences obtained are compared with the characteristics of the composite medium with spherical particles.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию композитных сред с наночастицами. Такие среды обладают особыми свойствами, и могут быть использованы при создании нелинейных оптических устройств, сенсоров, устройств записи и передачи оптической информации [1]. Управление оптическими свойствами композитных плёнок может привести к улучшению их характеристик за счёт расширения спектра поглощения и увеличения амплитуды.

В работе проведено исследование композитной среды на основе диоксида титана с золотыми наночастицами. При анализе свойств такой среды использовалась модель эффективной среды Максвелла–Гарнетта [1]. В работе получены выражения для коэффициентов отражения и пропускания композитной среды, содержащей золотые наночастицы эллипсоидальной формы. Расчёты спектров проводились для случая, когда

объём содержащихся золотых частиц по сравнению с объёмом диоксида титана составлял 1 %.

Проведён расчёт дисперсионных зависимостей коэффициентов отражения, пропускания и поглощения композитной плёнки [2] на основе диоксида титана с золотыми наночастицами эллипсоидальной формы при разных соотношениях главных полуосей эллипсоида вращения и разных углах падения излучения. Анализ полученных спектров (рис. 1) показал зависимость положения и амплитуды пиков поглощения от угла падения излучения на композитную среду и формы наночастиц.

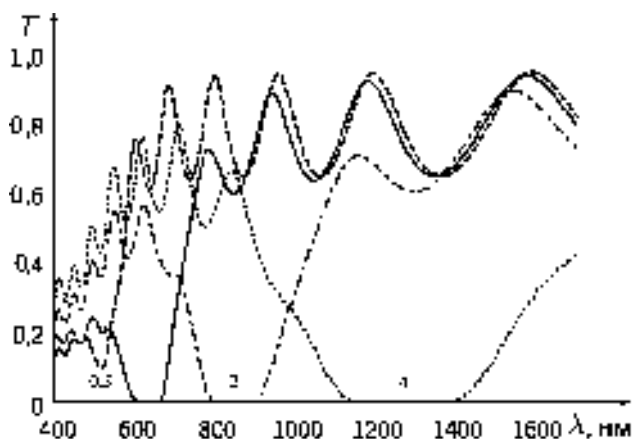


Рис. 1. Спектры пропускания для плёнок с частицами эллипсоидальной формы с разным отношением полярной и экваториальной полуосей ($a/b = 0,5; 1; 2; 4$)

Установлено, что при использовании наночастиц более вытянутой формы по сравнению со сферическими частицами спектры поглощения сдвигаются в длинноволновую область и происходит расширение полосы поглощения. Увеличение угла падения излучения на композитную среду с вытянутыми частицами вызывает сдвиг характеристик в сторону меньших длин волн в сравнении со сферическими частицами.

Полученные результаты позволяют оптимизировать соответствующие параметры композитных сред для конкретного использования.

Список литературы

1. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства композитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 6. С. 619-638.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970.

Х. НАССЕР, В.А. АСЕЕВ, А.И. ИГНАТЬЕВ, Н.В. НИКОНОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СПЕКТРЫ УСИЛЕНИЯ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ В ХЛОРИДНОМ ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

Проведено исследование лазерных свойств хлоридного фототерморефрактивного стекла, активированного ионами иттербия. Спектры усиления были записаны при различных мощностях накачки для иттербиевого стекла до и после записи брэгговской решётки. Получено сечение усиления $0,1 \times 10^{-20} \text{ см}^2$ в обоих стёклах.

K. NASSER, D.A. ASEEV, A.I. IGNATIEV, N.V. NIKONOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

GAIN SPECTRA OF YTTERBIUM-DOPED CHLORIDE PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS

The laser properties of chloride photo-thermo-refractive glass doped with ytterbium ions are presented. The gain spectra of the glasses were recorded for different pumping intensities before and after recording a volume Bragg grating. The gain cross sections of $0.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2 \text{ cm}^2$ were obtained in both glasses.

Иттербий имеет довольно великую полосу пропускания около 1 мкм по сравнению с другими редкоземельными ионами, например, с неодимом. Это позволяет применить иттербиевые стекла и кристаллы в качестве усилителей и активной среды и в лазерах сверхкоротких импульсов [1]. Фототерморефрактивное (ФТР) стекло является мультифункциональным материалом, который можно активировать редкоземельными ионами и одновременно записать в нем брэгговскую решётку, что даёт потенциальную возможность создания лазеров с распределённой обратной связью [2]. Спектроскопические характеристики хлоридных фототерморефрактивных стёкол, активированных ионами иттербия, были подробно исследованы в предыдущей работе [3].

Целью данной работы является исследование спектров усиления ионов иттербия в хлоридном ФТР-стекле до и после записи брэгговская решётка и оценка влияния брэгговской решётки на лазерные свойства.

В качестве материала исследования были подготовлены два одинаковых образца из иттербиевых хлоридных ФТР-стёкол. Брэгговская решётка была записана в одном из них лазером He-Cd (325 нм). Доза облучения составила 2 Дж/см². Образец был термообработан при температуре 530 °С на 20 ч. Концентрация иттербия в стёклах составила $3,9 \times 10^{20}$ см⁻², а толщина образцов – 0,9 мм. Для получения спектров усиления были записаны спектры пропускания стёкол в интервале 950 - 1100 нм при разных мощностях накачки диодным лазером длиной волны 915 нм. Следует отметить, что сечение поглощения стекла на длине волны 915 нм составляет $0,13 \times 10^{20}$ см⁻².

На рис. 1 и 2 предоставлены полученные спектры усиления стёкол при различных мощностях накачки. Значения сечения усиления составили $\sigma_g = 0,1 \times 10^{-20}$ см² в исходном стекле и стекле с решёткой при мощности накачки 200 и 350 мВт, соответственно. Эту разницу мы объясняем влиянием широкой полосы поглощения плазмонного резонанса, которая тянет до инфракрасной области, что приводит к поглощению часть накачки на 915 нм.

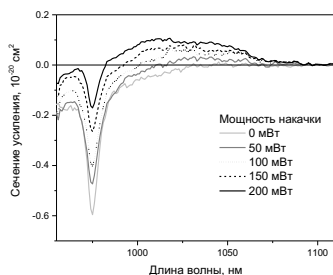


Рис. 1. Спектры усиления исходного иттербиевого хлоридного ФТР-стекла

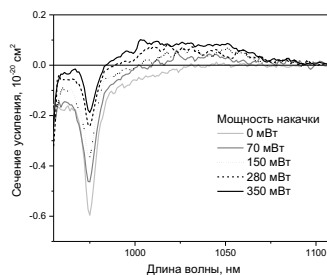


Рис. 2. Спектры усиления иттербиевого хлоридного ФТР-стекла в котором записана решётка Брэгга

Список литературы

1. Hönninger C., Paschotta R., et al. // Applied Physics B. 1999. V. 69. P. 3-17.
2. Nikonorov N.V., Ivanov S.A., et al // Holographic Materials and Optical Systems. 2017.
3. Nasser K., Aseev V.A., et. al // Journal of Non-crystalline Solids. 2021. V. 563. P. 120807.

О.К. МАЛЫШЕВ¹, И.Л. МАРТЫНОВ¹, А.А. ЧИСТЯКОВ¹,
Н.В. ГАПОНЕНКО^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ФОТОННЫХ СТРУКТУР ИЗ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ С УЧЁТОМ ОКИСЛЕНИЯ

Приведены результаты исследования закономерностей термического окисления микрорезонаторов из пористого кремния и представлена математическая модель, позволяющая оценить степень окисления по спектру отражения.

O.K. MALYSHEV¹, I.L. MARTYNOV¹, A.A. CHISTYAKOV¹,
N.V. GAPONENKO^{1,2}

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

MATHEMATICAL SIMULATING OF REFLECTION SPECTRA OF PHOTONIC STRUCTURES MADE OF POROUS SILICON WITH OXIDATION RATE TAKEN INTO ACCOUNT

The results of studying the patterns of thermal oxidation of porous silicon microcavities are presented, also a mathematical model that makes it possible to evaluate the oxidation rate from the reflection spectrum is presented.

Пористый кремний (ПК) и фотонные структуры на его основе являются популярной платформой для внедрения люминофоров различной природы [1, 2] и разработки оптических сенсоров [1, 3].

Для стабилизации и повышения устойчивости изготовленные образцы традиционно подвергаются принудительному термическому окислению в при температуре 200 - 800 °С [4], что приводит к образованию на поверхности пор оксидной плёнки. Резкое увеличение объёмной доли оксида кремния в гетерогенной системе приводит к смещению спектра отражения образца в коротковолновую область.

Целью данной работы стало построение математической модели на основе метода матриц переноса, позволяющей количественно оценить объёмную долю оксида в фотонной структуре из пористого кремния путём

измерения её спектров отражения до и после процесса окисления. Была изготовлена серия образцов микрорезонаторов из ПК с длиной волны собственной моды в диапазоне 570 - 580 нм, а также рассчитаны их спектры отражения. Величины пористости и толщины отдельных слоёв структуры были рассчитаны на основании работы [5]. Для расчёта эффективного показателя отдельных слоёв использовалась трёхкомпонентная модель эффективной среды Бруггемана, при этом учитывался эффект снижения пористости при окислении структуры [4]. Как видно из рис. 1 и 2 расчётные спектры отражения согласуются с экспериментальными данными. Наилучшее соответствие для окислённых образцов достигается, если при моделировании принять степень окисления структуры равную 80 %. Независимый инструментальный анализ созданных образцов методом рентгенофлуоресцентного анализа показал, что фактическая средняя степень окисления структуры из пористого кремния составляет $81 \pm 5 \%$, что согласуется с параметрами модели.

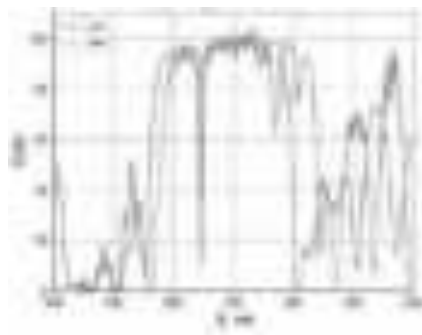


Рис. 1. Спектр отражения микрорезонатора из ПК до окисления

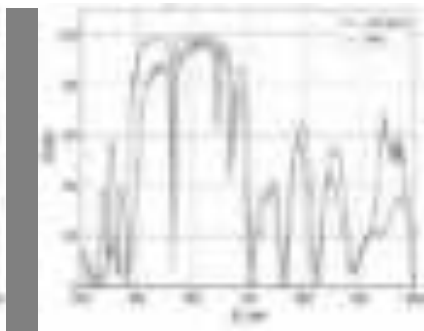


Рис. 2. Спектр отражения микрорезонатора из ПК после окисления

Список литературы

1. Osipov E.V., et al. Silicon photonic structures with embedded polymers for novel sensing methods // *Opt. Spectrosc.* 2017. V. 122. No. 1. P. 74-78.
2. Dovzhenko D., et al. Porous silicon microcavity modulates the photoluminescence spectra of organic polymers and quantum dots // *Materials Today: Proceedings.* 016. V. 3. No. 2. P. 485-490.
3. Levitsky I.A. Porous silicon structures as optical gas sensors // *Sensors (Switzerland)*. 2015. V. 15. No. 8. P. 19968-19991.
4. Pap A.E., et al. Thermal oxidation of porous silicon: Study on structure // *Appl. Phys. Lett.* 2005. V. 86. No. 4.
5. Rakhimov R.A., et al. Influence of electro-chemical etching parameters on the reflectance spectra of porous silicon rugate filters // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 737. No. 1.

Г.В. ШАДРИНА^{1,2}, Е.Н. БУЛГАКОВ^{2,3}

¹*Институт вычислительного моделирования ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

³*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ОПТИЧЕСКАЯ БИСТАБИЛЬНОСТЬ ПО УГЛУ И НАРУШЕНИЕ СИММЕТРИИ В КОНЕЧНОМ ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

Показано, каким образом происходит смещение области оптической бистабильности (ОБ) в зависимости от угла падения внешней волны, а также наличие областей бистабильности по третьему изменяемому параметру (кроме частоты и мощности) – углу падения. Проведено сравнение пороговых величин мощности для наступления ОБ и явления нарушения симметрии.

G.V. SHADRINA^{1,2}, E.N. BULGAKOV^{2,3}

¹*Institute of Computational Modelling, Federal Research Center of KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center of KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

³*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

OPTICAL ANGULAR BISTABILITY AND SYMMETRY BREAKING IN A FINITE PHOTONIC CRYSTAL

It is shown how the region of optical bistability (OB) shifts depending on the angle of incidence of the external wave, as well as the bistability region presents with third variable (except for frequency and power) – the angle of incidence. The power thresholds for the onset of OB and the symmetry breaking phenomenon are compared.

Нелинейное распространение света в периодических структурах является привлекательной областью исследований и приложений. Ключевую роль при нелинейном распространении света играют явления оптической бистабильности и нарушение симметрии при симметричном расположении структуры [1, 2].

Целью работы является исследование порога наступления этих явлений при изменении угла падения внешней плоской волны и размера самого фотонного кристалла (ФК). На рис. 1 представлен общий вид 2D ФК с одной (рис. 1а) и двумя (рис. 1б) керровскими микрополостями. Амплитуда возбуждения микрорезонатора при единичной внешней волне рассчитывалась с помощью модального метода Т-матрицы [3], обобщённого на случай микрорезонаторов, поддерживающих монополярную моду.



Рис. 1. 2D ФК структуры с одной (рис. 1а) и двумя (рис. 1б) микрополостями, составленные из бесконечных цилиндров, тёмно-серым цветом помечены цилиндры с керровой добавкой к пористости

Изменение угла падения внешней волны приводит к смещению области бистабильности по мощности внешней волны (рис. 2), что было получено для ФК с одним керровским микрорезонатором. Для этой же системы показано, что область бистабильности существует и при фиксированной мощности, когда изменяется только угол падения.

Добавление в ФК второго керровского микрорезонатора позволило наблюдать эффект нарушения симметрии на монополюсной моде. Как оказалось, порог для наступления явления нарушения симметрии (рис. 3) имеет иную зависимость от угла падения внешней волны, нежели порог для оптической бистабильности и слабо зависит от Q-фактора моды, как это было для оптической бистабильности (ОБ).

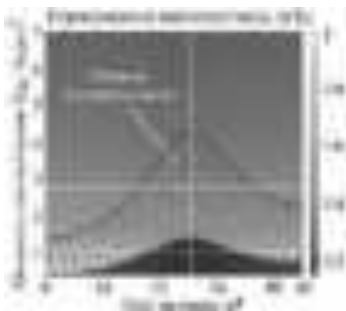


Рис. 2. Карта возбуждения микрорезонатора с рис. 1а

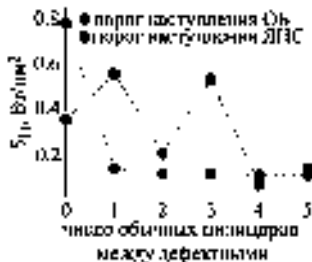


Рис. 3. Пороги наступления ОБ и ЯНС для структур типа как на рис. 1б

Список литературы

1. Шадрин Г.В., Булгаков Е.Н. // ЖЭТФ. 2022. V. 162 (5). P. 646.
2. Joannopoulos J., Johnson S., et al. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light. Princeton: Princeton University Press, 2007.
3. Yasumoto K. Electromagnetic theory and applications for photonic crystals. New York: Taylor & Francis, 2006.

А.В. ХАРИТОНОВ¹, А.И. МИНИБАЕВ¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

МЕТАМАТЕРИАЛЫ С ПЕРЕМЕННЫМИ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРАМИ: ДИЗАЙН ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

В работе исследуются механизмы, позволяющие управлять временной неоднородностью метаматериалов с переменными во времени параметрами. Разработана платформа для реализации сверхбыстрого суб-фемтосекундного оптического отклика на основе плазмонных материалов с квазинулевой дисперсией.

A. V. KHARITONOV¹, A. I. MINIBAEV¹, S. S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

TIME-VARYING MATERIALS FOR PHOTONICS: THE ROLE OF DISPERSION

In this work we investigate mechanisms that allow for tailoring the temporal inhomogeneity of time-varying materials. A material platform for realization of an ultrafast sub-picosecond response based on plasmonic materials with flat dispersion is proposed.

Метаматериалы занимают одно из центральных мест в фотонике, предоставляя беспрецедентные возможности в управлении оптическими полями [1]. Настройка оптических свойств осуществляется за счёт дизайна структурных элементов – метаатомов – и их упаковки. Таким образом, ключевую роль играет структура пространственной неоднородности. В последнее время большой интерес привлекли метаматериалы, которые однородны в пространстве, но неоднородны во времени [2]. Временная неоднородность реализуется путём модуляции одного или нескольких оптических параметров (диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости и других.) с помощью внешнего воздействия. В подобных системах был предсказан и обнаружен ряд экзотических явлений, которые представляют интерес как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения практических применений.

Эффективность взаимодействия света с временным интерфейсом определяется временем переключения, которое должно быть как можно меньше и не превосходить период колебаний волны [3]. Перспективной платформой для реализации сред с переменными параметрами являются плазмонные материалы и структуры, возбуждаемые импульсной лазерной накачкой [4]. В настоящей работе предложены и созданы среды, которые позволяют добиться ультракороткого времени жизни плазмонного возбуждения порядка 0.1 фс. Данное время на порядок меньше времён, характерных для других плазмонных материалов (рис. 1). Исследованы механизмы, влияющие на скорость переключения и оптический контраст. Уменьшение времени жизни было достигнуто путём уменьшения спектральной дисперсии действительной части диэлектрической проницаемости. Для этого в работе были использованы настраиваемые плазмонные материалы на основе оксинитрида титана (TiON).

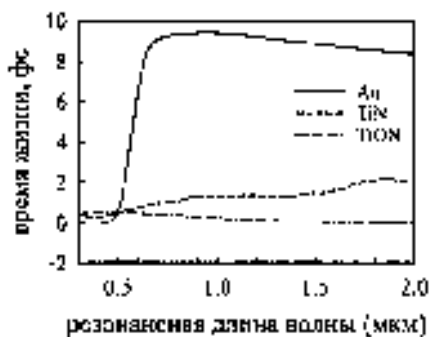


Рис. 1. Время жизни плазмонного возбуждения для различных значений резонансной длины волны

Полученные результаты открывают возможности увеличения эффективности преобразования света на временных интерфейсах, а также позволяют увеличить пропускную способность. Данные факторы играют важную роль в аналоговых оптических вычислениях [5].

Работа выполнена за счёт средств Российского научного фонда (проект № 22-72-00091).

Список литературы

1. Kadic M., Milton G.V., et al. // Nat. Rev. Phys. 2019. V. 1. P. 198-210.
2. Galiffi E., Tirole M., et al. // Adv. Photonics. 2022. V. 4. P. 014002.
3. Galiffi E., Yin S., Alu A. // Nanophotonics. 2022. V. 11. P. 3575-3581.
4. Bruno V., DeVault C., et al. // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 343. P. 043902.
5. Silva A., Monticone F., et. al. // Science. 2014. V. 12. P. 160-162.

О.А. ШУТОВА, С.М. ТРУШИН

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ГЕНЕРАЦИЯ ГАРМОНИК АТОМАРНЫМИ ГАЗАМИ В ВЕКТОРНЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКАХ

В последнее время благодаря новым возможностям в эксперименте возрос интерес к созданию оптических вихрей в излучении высоких гармоник, управлению эффективностью их генерации и состоянием поляризации. Появились экспериментальные работы, в которых генерация гармоник высших порядков (ГВВП) происходит в оптических векторных полях [1, 2]. Но в то же время, несмотря на большое количество экспериментов по ГВВП, пока не существует теории, аккуратно описывающий данный процесс. В настоящей работе используется непertурбативный подход [3], в рамках которого атом описывается при помощи точных трёхмерных волновых функций, что позволяет учесть сложную геометрию задачи, о движении электрона в суперпозиционном поле кулоновского потенциала и внешнего вихревого векторного пучка при условии сопоставимости напряжённостей.

O.A. SHOUTOVA, S.M. TRUSHIN

Lomonosov Moscow State University

GENERATION OF HARMONICS BY ATOMIC GASES IN VECTOR VORTEX FIELDS

Recently, due to new possibilities in the experiment, interest has increased in the creation of optical vortices in the radiation of high harmonics, in controlling the efficiency of their generation and the state of polarization. Experimental works have appeared in which high harmonic generation (HHG) occurs in optical vector fields [1, 2]. However, at the same time, despite the large number of experiments on HHG, there is still no theory that accurately describes this process. In this paper, we use a nonperturbative approach [3], in which the atom is described using exact three-dimensional wave functions, which allows us to take into account the complex geometry of the problem of the motion of an electron in the superposition field of the Coulomb potential and an external vortex vector beam under the condition that the strengths are comparable.

В работе теоретически рассмотрен процесс генерации гармоник высших порядков (ГВВП) в разреженной атомарной среде, локализованной вблизи фокальной плоскости, под действием векторных пучков с пространственной структурой поля, при наличии как спинового,

так и орбитального момента. Такие поля обладают экзотическими свойствами, такие как обратный поток и циркуляция энергии, и с помощью процессов ГГВП можно получать высокие гармоники с заданными порядками оптических вихрей, что было показано на примере генерации гармоники второго порядка. В экспериментах по ГГВП атомарными газами, как правило, в качестве среды используются благородные газы, в проводимом нами численном эксперименте мы рассматривали газ неона. Анализ поляризованного состояния гармоник проводился с помощью обобщённых параметров Стокса [4, 5]. Эти параметры учитывают третью компоненту поля, в отличие от классических параметров Стокса, которые описывают поведение произвольного двумерного поля. Обобщённые параметры Стокса дают полную информацию о поведении поля: степень и вид поляризации, её направление и положение в пространстве.

Список литературы.

1. Trob J., Trallero-Herrero C.A. High harmonic generation spectroscopy via orbital angular momentum // J. Chem. Phys. 2019. V. 151. P. 084308.
2. Gui G., Brooks N.J., Kapteyn H.C., et al. // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 608-613 .
3. Андреев А.В., Стремоухов С.Ю., Шутова О.А. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2018. Т. 154. № 1. С. 31-43.
4. Sheppard C.J.R. // Phys. Rev. A. 2014. V. 90. P. 023809.
5. Setälä T., Shevchenko A., Kaivola M., Friberg A.T. // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. 016615.
6. Bekshaev A., et al. // J. Opt. 2011. V. 13. P. 053001.
7. Gui G., Brooks N.J., Kapteyn H.C., et al. // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 608-613.

Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, Д.Н. МАКСИМОВ^{1,2}, Г.-П. ЧЭНЬ³,
И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}

¹*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

³*Национальный университет Чао-Тунг, Тайнань, Тайвань*

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМ ПУЧКОМ С ПОМОЩЬЮ ТАММОВСКОГО ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНА

Исследованы таммовские плазмон-поляритоны, локализованные на границе субволновой решётки, сопряжённой с брэгговским зеркалом. Продемонстрирована возможность динамического управления фазой и амплитудой отражённых волн на длине волны таммовского плазмон-поляритона.

R.G. BIKBAEV^{1,2}, D.N. MAKSIMOV^{1,2}, K.-P. CHEN³,
I.V. TIMOFEEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center of KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

³*National Yang Ming Chiao Tung University, Tainan, Taiwan*

BEAM STEERING BY TAMM PLASMON POLARITON

We consider Tamm plasmon polariton in a subwavelength grating patterned on top of a Bragg reflector. We demonstrate dynamic control of the phase and amplitude of a plane wave reflected from such metagrating due to resonant coupling with the Tamm plasmon polariton.

Метаповерхность представляет собой специальным образом структурированные субволновые элементы, предназначенные для эффективного управления фазой и амплитудой отражённого света [1, 2]. При этом актуальной является задача создания настраиваемой метаповерхности, обеспечивающей формирование сколь угодно сложного волнового фронта [3, 4].

В этой работе нами продемонстрирована возможность эффективной перестройки волнового фронта в ближней инфракрасной области спектра посредством внедрения плёнки прозрачного проводящего оксида в структуру, поддерживающую возбуждение таммовского плазмон-поляритона (ТПП) [5, 6]. Схематическое изображение исследуемой структуры представлено на рис. 1. Решётка из серебрянных нанополос расположена на тонком слое сапфира, нанесённого на слой оксида индия,

допированного оловом (ITO). Вся структура помещена на поверхность многослойного зеркала. Установлено, что на длине волны 1550 нм проявляется узкий резонанс, соответствующий ТПП. Увеличение приложенного к ITO-слою напряжения приводит к смещению резонансной длины волны в коротковолновую область спектра и значительному изменению фазы отражённой волны. Таким образом появляется возможность создания управляемых дифракционных решёток, период которых определяется количеством нанополос с разным прикладываемым напряжением. Из рис. 1*b* видно, что изменение периода решётки приводит к значительному (около 30 градусов) изменению углов ± 1 -го порядка дифракции. Отметим, что интенсивность нулевого порядка равна 0. Это объясняется деструктивной интерференцией волн, распространяющихся по нормали к поверхности решётки вследствие того, что разность фаз отражённых волн от соседних нанополос равна π .

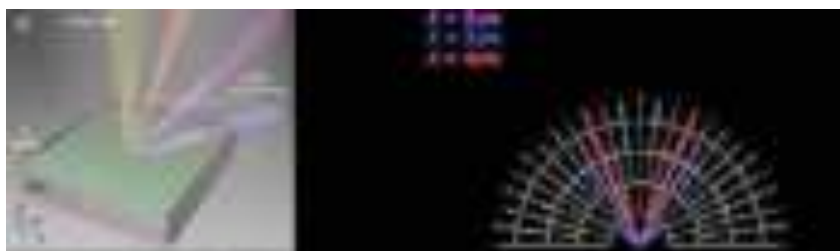


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой структуры (а); интенсивность дифракционных максимумов в дальнем поле в зависимости от периода решётки (b)

Таким образом, разработанное устройство позволяет управлять направлением светового пучка в широком диапазоне углов и обладает значительным потенциалом для разработки ультратонких устройств, таких как наноразмерные лидары и пространственные модуляторы света.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-42-08003

Список литературы

1. He Q., et al. // Research. 2019. V. 2019. P. 16.
2. Chen W.T., et al. // Nat. Rev. Mat. 2020. V. 5. P. 604.
3. Lee Y., et al // Adv. Opt. Mat. 2020. V. 8. P. 2001256.
4. Huang Y.-W., // Nano Lett. 2016. V. 16. P. 5319.
5. Kaliteevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
6. Bikbaev R.B., et al. // Opt. Exp. 2021. V. 29. P. 4672-4680.

Н.Ю. КУЗНЕЦОВ, К.С. ГРИГОРЬЕВ, И.А. НИКОЛАЕВА,
А.Е. РЯДЧЕНКО, Н.А. ПАНОВ, Д.Е. ШИПИЛО, О.Г. КОСАРЕВА,
В.П. КАНДИДОВ, В.А. МАКАРОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛИНИЙ
СИНГУЛЯРНОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ СВЕТА,
ФОРМИРУЕМЫЕ ПРИ ЕГО ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКЕ**

Описана структура нетривиальных узлов и зацеплений линий сингулярности поляризации когерентного света вблизи точки геометрического фокуса при его фокусировке линейной линзой. Установлены основные закономерности видоизменения данных структур при варьировании параметров задачи и существующие при этом правила отбора.

N. Yu. KUZNETSOV, K.S. GRIGORIEV, D.E. SHIPILO,
I.A. NIKOLAEVA, A.E. RYADCHENKO, N.A. PANOV,
O.G. KOSAREVA, V.P. KANDIDOV, V.A. MAKAROV

Lomonosov Moscow State University

**TOPOLOGICAL FEATURES OF POLARIZATION
SINGULARITY LINES FORMED DURING ITS TIGHT
FOCUSING**

The structure of nontrivial knots and links of polarization singularity lines in coherent light is described near the geometric focal point during its tight focusing by a linear lens. The main regularities of the evolution of these structures under variation of the problem parameters are shown alongside with the selection rules existing for these patterns.

При рассеянии эллиптически поляризованной электромагнитной волны неоднородными средами и в ряде нелинейных оптических процессов в поляризационной структуре распространяющегося излучения могут возникать топологические особенности – изолированные линии в пространстве, поляризация света в точках которых строго линейная или строго циркулярная [1]. В ряде случаев эти линии могут формировать топологически нетривиальные структуры более высокого порядка, имеющие зацепления и узлы [2 - 4]. Хотя их исследование представляет главным образом фундаментальный интерес, существуют перспективы

использования подобных структурированных состояний света для кодирования информации в задачах информационной оптики [5].

Нами установлено, что подобные топологически нетривиальные структуры возникают даже в достаточно простых задачах острой линейной фокусировки гауссовых и лаггерр-гауссовых пучков лазерного излучения, а также их линейных комбинаций. Численными методами проведено исследование возможных конфигураций образующихся в этих полях линий сингулярности поляризации (рис. 1). Найдены основные правила отбора возможных конфигураций линий поляризационных сингулярностей, возникающих при острой фокусировке света, указаны условия, при которых они выполняются, проведено описание эволюции линий сингулярностей поляризации при изменении задающих конфигурацию лазерного пучка параметров. В большинстве случаев, исключая конфигурации аксиальной симметрии бесконечного порядка, глобальным инвариантом возникающих конфигураций является чётность коэффициента зацепления между сингулярными линиями разных типов (циркулярной и линейной поляризации). При наличии в топологической структуре поля только замкнутых линий, неизменным остаётся и точное значение модуля этого коэффициента.

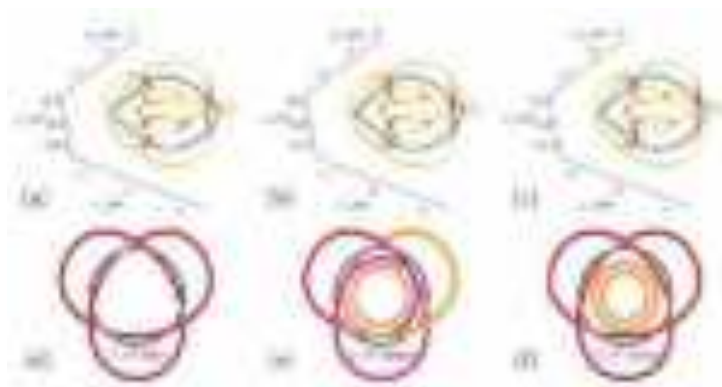


Рис. 1. Трёхмерные конфигурации сингулярных линий (*a - c*) и соответствующих им диаграмм зацепления (*d - f*) при острой фокусировке пучка Пуанкаре

Список литературы

1. Berry M.V., Dennis M.R. // Proc. of the Royal Society A. 2001. V. 457 (2005). P. 141.
2. Berry M.V., Dennis M.R. // Proc. of the Royal Society A. 2001. V. 457 (2013). P. 2251.
3. Sugic D., Dennis M.R. // J. Opt. Soc. Am. A. 2018. V. 35 (12). P. 1987.
4. Zhong J., Liu S., Guo X., et al. // Optics Express. 2021. V. 29 (23). P. 38849.
5. Larocque H., D'Errico A., Ferrer-Garcia M.F., et al. // Nature Comm. 2020. V. 11 (1). P. 5119.

М.Е. ХАВРОНИН, А.А. ВИШНЕВЫЙ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ЭФФЕКТ ГУСА–ХЕНХЕН В СИНГУЛЯРНОЙ ТОЧКЕ ОТРАЖЕНИЯ

Поперечный сдвиг луча при отражении пропорционален производной фазы отражения относительно угла падения. В сингулярной точке нулевого отражения фаза изменяется скачком, что даёт формально бесконечный сдвиг. В этой работе подробно изучен эффект Гуса–Хенхен в сингулярной точке и показано, что в этом случае гауссов пучок отражается в линейную комбинацию лучей Гаусса–Лагерра с орбитальными угловыми моментами $+1$ и -1 , а максимальная величина поперечного сдвига ограничена диаметром перетяжки падающего луча.

M.E. KHAVRONIN, A.A. VYSHNEVYY

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

GOOS–HÄNCHEN SHIFT AT SINGULAR REFLECTION POINT

Goos–Hänchen shift of the reflected beam is determined by the derivative of the reflection phase with respect to the angle of incidence. In a singular reflection point the reflection phase changes abruptly which leads to the formally infinite shift. We study the Goos–Hänchen at a singular reflection point, and find that the reflected beam is composed of two Laguerre–Gaussian beams with orbital angular momenta of $+1$ and -1 , while the maximum possible shift is limited by the waist of the incident beam.

Эффект Гуса–Хенхен является одним из проявлений волновой природы света, приводящей к отклонениям от законов геометрической оптики: при отражении от поверхности луч смещается относительно точки падения луча на поверхность. В большинстве случаев смещение оказывается очень малым, однако в последнее время были открыты способы его усилить и использовать в сенсорах и оптических дифференциаторах [1]. Объясняется эффект тем, что локализованный в пространстве луч представляет собой набор плоских волн, каждая из которых при отражении набирает свою фазу. Возникающее вследствие этого смещение отражённого луча определяется тем, насколько быстро фаза отражения изменяется при изменении угла падения [2]. В случае, если амплитуда отражения близка к нулю, производная меняется очень быстро (а в сингулярной точке или, иначе говоря, нуле отражения,

скачком), что формально даёт практически «бесконечный» поперечный сдвиг [3]. В данной работе исследуется отражение светового пучка в сингулярной точке. Падающий свет рассматривается как гауссов пучок, а коэффициент отражения считается в окрестности нуля как $r = C(|\mathbf{k}_{\parallel}| - |\mathbf{k}_{\text{cr}}|)$, где \mathbf{k}_{\parallel} – проекция волнового вектора падающей волны на отражающую поверхность, а \mathbf{k}_{cr} – компонента волнового вектора в плоскости отражающей поверхности, соответствующая нулевому отражению.

Расчёты показывают, что отражённый луч представляет собой суперпозицию мод Лагерра–Гаусса с орбитальными моментами $l = \pm 1$ (рис. 1). Расстояние между пиками интенсивности в поперечном сечении определяется радиусом перетяжки w_0 , определяемым гауссовым распределением. Распределение электрического поля в отражённом луче представляет собой производную распределения поля в падающем пучке в направлении перпендикулярном направлению распространения, что позволяет использовать такую конфигурацию в оптических вычислительных схемах.

Чтобы сравнить результат с формулой для величины сдвига Гуса–Хенхен, мы рассмотрели коэффициент отражения в виде:

$$r = C(|\mathbf{k}_{\parallel}| - |\mathbf{k}_{\text{inc}}|) + r_0, \quad (1)$$

где r_0 – значение коэффициента отражения при $\mathbf{k}_{\parallel} = \mathbf{k}_{\text{inc}}$, а \mathbf{k}_{inc} – компонента волнового вектора падающего луча в плоскости отражающей поверхности. Чем меньше r_0 , тем больше сдвиг, однако, когда он достигает величины сопоставимой с радиусом перетяжки, возникает и растёт второй максимум, а при $r_0 \rightarrow 0$ распределение интенсивности становится симметричным (рис. 2).



Рис. 1. Распределение интенсивности падающего и отражённого лучей в плоскости падения

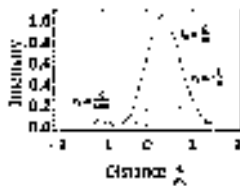


Рис. 2. Профиль интенсивности отражённого света для разных значений r_0 в формуле (1)

Список литературы

1. Jiang L., Zeng S., Xu Z., et al. // Small. 2007. V. 13. P. 1700600.
2. Artmann K. // Ann. Physik. 1948. V. 437. P. 87.
3. Yin X., Hesselink L. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 261108.

Т.А. ГЕЙНЦ, И.Ю. ГЕЙНЦ, О.А. ШУТОВА
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВЕКТОРНОГО БЕССЕЛЕВА ПУЧКА

Работа посвящена характеристике пространственного распределения интенсивности и поляризации сфокусированных вихревых бесселевых пучков. Характер и количество рассчитываемых данных позволяет использовать искусственную нейронную сеть для выявления особенностей распределения поля, интенсивности и поляризации параметров в поперечном сечении пучка, а также связать эти особенности с исходными параметрами пучка.

T.A. GEINTS, I.Yu. GEINTS, O.A. SHUTOVA
Lomonosov Moscow State University

INVESTIGATION OF THE POLARIZATION PROPERTIES OF A VECTOR BESSEL BEAM

The work is devoted to the characterization of the spatial intensity distribution and polarization of focused vortex Bessel beams. The nature and quantity of the calculated data makes it possible to use an artificial neural network to identify the features of distribution of the field, intensity, and polarization parameters in the beam cross section, as well as to relate these features to the initial beam parameters.

Поля в векторных бесселевых пучках обладают сложной амплитудно-фазовой структурой, могут нести как спиновый, так и орбитальный угловой момент, что существенно сказывается на их взаимодействии с веществом. В последнее время бесселевы пучки привлекают всё больший интерес благодаря ряду отличительных свойств: устойчивостью к дифракционному расплыванию, удлинённой (по сравнению с гауссовыми пучками) фокальной областью, самовосстановлением, поляризационными особенностями, наличием обратного потока энергии в фокусе и др. В этой относительно новой и активно развивающейся области вопросы фундаментального плана, связанные с описанием взаимодействия такого света с веществом, развиваются параллельно практическим применениями в области микроскопии сверхвысокого разрешения [1], лазерных ускорителях [2], спектроскопии высоких гармоник [3, 4] а также в областях наблюдения и управления химическими реакциями [5, 6]. Однако в большинстве работ решение для поля бесселева пучка, сформированного, например, конической линзой, представляется в

скалярном параксиальном приближении без учёта неоднородности его поляризации, играющей важнейшую роль при взаимодействии со средой. Это обусловлено тем, что векторное решение имеет достаточно сложный вид и обладает продольной компонентой поля, что заставляет при описании его поляризационных свойств обращаться к обобщённым параметрам Стокса. В работе [7] предложено ввести параметр линейности поляризации:

$$P = \frac{\sqrt{\Lambda_0^2 - \frac{4}{9}(\Lambda_2^2 + \Lambda_5^2 + \Lambda_7^2)}}{\Lambda_0},$$

где Λ – обобщённые параметры Стокса, а параметр P принимает значения от 0 до 1, где 0 соответствует круговой поляризации, а 1 – чисто линейной. Отличие такого математического описания состоит в том, что теперь эллипс поляризации задается в трёхмерном пространстве. Именно это описание используется в данной работе для моделирования состояний поляризации бесселевых пучков, что позволяет изучить многие особенности, упущенные в упрощённом описании.

Большое количество получаемых данных позволяет обучить нейросеть узнавать параметры пучка по наблюдаемым особенностям, что в дальнейшем позволит по структуре фокального пятна распознавать порядок, входящих в него вихревых компонент, что играет важнейшую роль как в фундаментальном аспекте взаимодействия таких полей с веществом, так и во множестве новейших приложений. Проведено моделирование фокусировки бесселева пучка с различными параметрами, такими как, порядок вихря, острота фокусировки, поляризация входного излучения и функция аподизации в рамках теории, не ограниченной скалярным параксиальным приближением. Был проведён расчёт параметров поляризации этих пучков. Сформирована базы данных и обучена нейросеть, определяющая порядки вихревых компонент, входящих в пучок, по особенностям распределения интенсивности в фокальной плоскости, а также на различных небольших (порядка нескольких длин волн) расстояниях от него.

Список литературы

1. Yu W., et al. // *Laser & Photonics Review*, 2015. V. 147.
2. Miao B., et al. // *Physical Review X*. 2022. V. 12. P. 031038.
3. Trob J., Trallero-Herrero C.A. // *J. Chem. Phys.* 2019. V. 151. P. 084308.
4. Melik-Gaykazyan E.V., et al. // *ACS Photonics*. 2018. V. 5. No. 3. P. 728-733.
5. Rehl Benjamin, Ma E., et al. // *J. Am. Chem. Soc.* 2022. V. 144. No. 36. P. 16338-16349.
6. Bellcross A., et al. // *J. Am. Chem. Soc.* 2021 V. 143. P. 16653-16662.
7. Sheppard C.J.R. // *Phys. Rev. A*. 2014. V. 90. P. 023809.

А.С. БУРКОВ, Н.В. ТЕРЕЩЕНКО, И.В. ОБРОНОВ,
Д.В. МЯСНИКОВ
НТО «ИРЭ Полус», Фрязино

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОГО ПРОФИЛЯ И ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В ОБЪЁМНЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТКАХ

Представлена методика измерения фазовых профилей с использованием алгоритма Герберга-Сакстона, и её применение для диагностики записанных фазовых профилей пропускающих объёмных брэгговских решётках, а также термолинз, образующихся в них. С помощью модели определён фазовый профиль, который необходимо записать на дифракционный элемент для получения flat-top пучка, после чего было проведено сравнение модели с экспериментом.

A.S. BURKOV, N.V. TERESCHENKO, I.V. OBRONOV,
D.V. MYASNIKOV
IRE-Polus Corporation, Fryazino

TRANSMITTING VOLUME BRAGG GRATINGS AND ANALYSIS OF ITS PHASE PROFILE AND THERMAL LENS

This paper presents method of retrieval of phase profiles using Gerchberg-Saxton algorithm and its application for diagnostics of properties of phase profiles, recorded on the transmitting volume bragg gratings, as well as thermal effects in presence of laser emission, such as thermal lensing. Phase profile, which must be recorded on the diffractive element to obtain flat-top beam, has been determined by using model of propagation of light, and comparison with experiment was made.

Объёмные брэгговские решётки – новый компонент оптических систем, нашедший обширное применение в современной оптике для управления такими параметрами излучения как фаза и амплитуда, а также для растяжения импульсов и сужения полосы генерации лазеров благодаря их спектральной селективности [1]. Они позволяют добиться улучшения качества излучения, уменьшения размеров и сокращения числа элементов в оптических устройствах [2]. Однако, при неправильной записи фазового профиля, результат может отклоняться от желаемого, и необходимо уметь диагностировать особенности записанных профилей. Помимо этого, в решётке возникает термолинза, влияющая на последующее прохождение пучка. [3].

Целью данной работы является изучение фазовых профилей таких решёток, разработка методики диагностики записи этих профилей, а также изучение тепловых эффектов. Объектом изучения являлась объёмная брэгговская решётка с таким профилем, чтобы после прохождения через неё в перетяжке образовывался Flat-Тор пучок.

В основе методики лежит алгоритм Герберга-Сакстона, позволяющий по серии снимков интенсивности определить фазу [4]. Экспериментальная установка изображена на рис. 1. Для определения фазового вклада, рассчитывалась фаза излучения, прошедшего через решётку, и фаза излучения без решётки, после чего рассматривалась разность этих фаз. Такой подход позволяет минимизировать вклад aberrаций, возникающих в системе. При этом, проведя измерения при малой и высокой мощности и рассмотрев разность фазовых вкладов, можно получить фазовый вклад термолинзы, возникающей в решётке.

Также в работе была аналитически рассчитана фаза, которую нужно записать на решётку, чтобы образовался Flat-Тор пучок, которая совпала с экспериментом с хорошей точностью. Удалось выявить, что при записи решётка была наклонена под некоторым углом, из-за чего Flat-Тор наблюдался вдоль одной оси, а вдоль другой был сильно искажён. Был получен профиль термолинзы, её фокусное расстояние – 7 м, при мощности излучения 20 Вт.

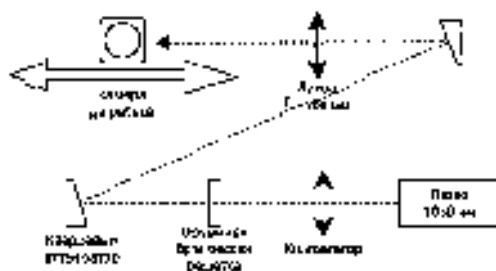


Рис. 1. Схема установки

Список литературы

1. Mohammadian N., et al. Versatile approach to laser beam shaping and analyzing by holographic phase masks // Journal of Optics. 2021. V. 23. No. 11. P. 115609.
2. Glebov L. Volume Bragg gratings in PTR glass-new optical elements for laser design // Frontiers in Optics. Optica Publishing Group, 2008. C. SThA4.
3. Jamieson T.H. Thermal effects in optical systems // Optical Engineering. 1981. V. 20. No. 2. P. 156-160.
4. Hansen A.K. Coherent laser phase retrieval in the presence of measurement imperfections and incoherent light // Applied Optics. 2017. V. 56. No. 26. P. 7341-7345.

Е.Д. ЗАЛОЗНАЯ^{1,2}, А.Е. ДОРМИДОНОВ², В.П. КАНДИДОВ¹

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики
им. Н.Л. Духова, Москва*

**ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ДИСЛОКАЦИЙ
ПРИ ФИЛАМЕНТАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ,
СФОКУСИРОВАННОГО АКСИКОНОМ, В УСЛОВИЯХ
АНОМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ ГРУППОВОЙ СКОРОСТИ**

Методами численного моделирования исследовано формирование и динамика фазовых дислокаций в пространственно-временном распределении напряжённости светового поля фемтосекундного излучения, сфокусированного аксиконом, при филаментации в прозрачных диэлектриках в условиях аномальной дисперсии групповой скорости.

E.D. ZALOZNAYA^{1,2}, A.E. DORMIDONOV², V.P. KANDIDOV¹

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*N.L. Dukhov All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow*

**FORMATION OF PHASE DISLOCATIONS DURING
FILAMENTATION OF A PULSE FOCUSED BY AN AXICON
UNDER ANOMALOUS GROUP VELOCITY DISPERSION
CONDITION**

We study numerically the formation and dynamics of phase dislocations in the spatial-temporal distribution of the light field strength of femtosecond pulse focused by an axicon during filamentation in transparent dielectrics under conditions of anomalous group velocity dispersion.

Фокусировка плоского пучка фемтосекундного излучения при помощи аксикона (конической линзы) позволяет получить бессель-гауссово распределением интенсивности, которое близко к пространственной моде, формируемой в экстремально сжатом волновом пакете при аномальной дисперсии групповой скорости [1], и представляет собой узкий центральный максимум высокой интенсивности на оси пучка, окружённый менее интенсивными концентрическими кольцами [2]. Большая протяжённость области с высокой локализацией энергии в волновом пакете, сфокусированном аксиконом, по сравнению с длиной перетяжки при фокусировке сферической линзой, может лежать в основе

формирования стабильной последовательности высокоинтенсивных одноцикловых волновых пакетов среднего инфракрасного диапазона.

Целью работы является численное исследование динамической картины перераспределения светового поля волнового пакета при формировании филамента в условиях аксиконной фокусировки. Исследования выполнены на основе анализа напряжённости электрического поля, полученного с помощью параллельного компьютерного кода для однонаправленного уравнения распространения импульса в нелинейной диспергирующей среде. Рассмотрено фемтосекундное излучение гауссова пучка, сфокусированное в плавленый кварц и фториды тонким аксиконом из плавленого кварца с углом при основании, варьируемом от 1 до 10 °.

Продемонстрировано, что суперпозиция излучения с коническим волновым фронтом, созданным аксиконом (рис. 1а), со сходящимся фронтом, вызванным керровской фокусировкой, и расходящимся при дефокусировке в плазме формирует сложную картину с искажениями волнового фронта и появлением особых точек в распределении напряжённости светового поля (рис. 1б).

Установление общих закономерностей интерференции сходящегося волнового фронта позволит управлять филаментацией фемтосекундного излучения и формированием высокоинтенсивных экстремально сжатых волновых пакетов при аномальной дисперсии групповой скорости в условиях аксиконной фокусировки.

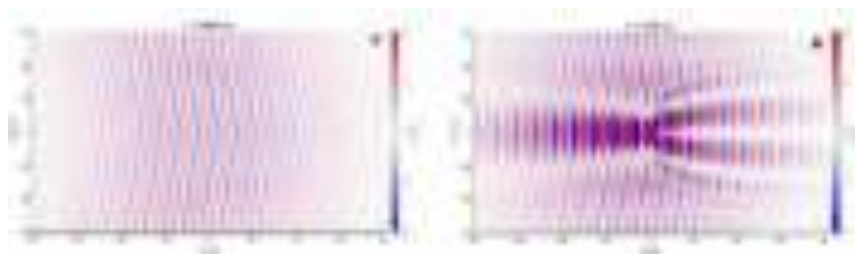


Рис. 1. Пространственно-временные распределения напряжённости светового поля при филаментации в фемтосекундном волновом пакете, сфокусированном аксиконом в плавленый кварц, на входе в образец (а), при образовании экстремально сжатого волнового пакета (б), зелёные точки указывают положения фазовых дислокаций, излучение распространяется справа – налево

Список литературы

1. Majus D. // Phys. Rev. Lett. 2014, V. 112, P. 193901.
2. Пятницкий Л.Н. Волновые бесселевы пучки. М.: Физматлит, 2012.

Д.Н. МАКСИМОВ^{1,2,3}, А.С. КОСТЮКОВ¹, А.Е. ЕРШОВ^{1,3},
Е.Н. БУЛГАКОВ^{2,3}, В.С. ГЕРАСИМОВ^{1,3}

¹*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

³*Институт вычислительного моделирования ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

ТЕРМООПТИЧЕСКИЙ ГИСТЕРЕЗИС СО СВЯЗАННЫМИ СОСТОЯНИЯМИ В КОНТИНУУМЕ

Исследован термооптический гистерезис в структуре из кремния, поддерживающей связанное состояние в континууме (ССК). Принимая во внимание радиационную теплопередачу как основной механизм охлаждения, мы построили нелинейную модель, описывающую оптический отклик. Показано, что при условии критической связи термооптический гистерезис может быть получен при низких интенсивностях падающего света $I_0 \approx 1$ Вт/м².

D.N. MAKSIMOV^{1,2,3}, A.S. KOSTYUKOV¹, A.E. ERSHOV^{1,3},
E.N. BULGAKOV^{2,3}, V.S. GERASIMOV^{1,3}

¹*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

²*Kirensky Institute of Physics, Federal Research Center of KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

³*Institute of Computational Modelling, Federal Research Center of KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

THERMO-OPTICAL HYSTERESIS WITH BOUND STATES IN THE CONTINUUM

We consider thermo-optic hysteresis in a silicon structure supporting a bound state in the continuum (BIC). Taking into account radiative heat transfer as a major cooling mechanism we constructed a nonlinear model describing the optical response. It is shown that the thermo-optic hysteresis can be obtained with low intensities of incident light $I_0 \approx 1$ W/m².

Мы рассматриваем массив идентичных диэлектрических стержней радиуса R_0 , расположенных с периодом L в вакууме. Стержни изготовлены из аморфного кремния. Оси стержней коллинеарны и ориентированы вдоль оси Z , как показано на рис. 1а. Такая система поддерживает связанное состояние в континууме (ССК). На рис. 1б показан профиль моды ССК, а также профиль квази ССК при угле падения 8.97°. В настоящей работе с применением методов FDTD и ТСМТ исследован оптический отклик структуры с учётом как

температурной, так и частотной зависимости показателя преломления. Показано, что изменение диэлектрической проницаемости стержней является ключевым фактором приводящим к эффекту термооптического гистерезиса. Получены зависимости температуры стержней от частоты и интенсивности падающего света, которые представлены на рис. 2. Значение фиксированной интенсивности падающего света на рис. 2а и 2в $I_0 = 0,54 \text{ Вт/м}^2$. Значения длины волны падающего света на рис. 2б и 2г $\lambda = 795,5 \text{ нм}$. Показано, что бистабильность возникает при удивительно низких интенсивностях падающего света, примерно $I_0 = 0,54 \text{ Вт/м}^2$. Бистабильность возникает с интенсивностями на одиннадцать порядков меньше, чем необходимые для проявления гистерезиса, связанного с керровской нелинейностью в кремнии. Таким образом, термооптические эффекты должны доминировать в нелинейном отклике кремниевых наноструктур, поддерживающих связанные состояния в континууме.

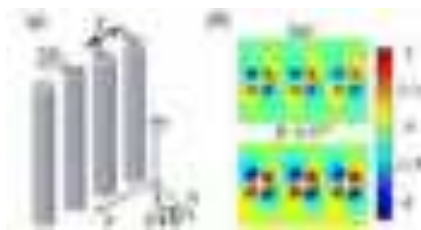


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемой структуры (а), сравнение между профилем собственной моды для ССК $\lambda = 782 \text{ нм}$ и решением рассеяния при освещении плоской волной с $\lambda = 785 \text{ нм}$, $R_0 = 128 \text{ нм}$, $L = 428 \text{ нм}$ (б)

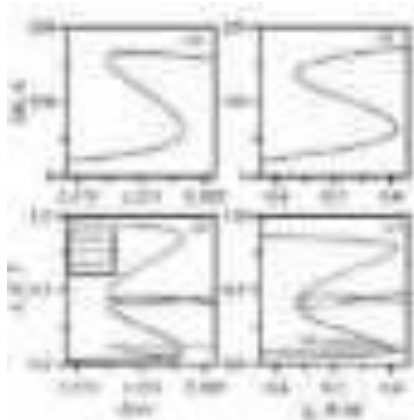


Рис. 2. Термооптический гистерезис при угле падения $\theta = 8,97^\circ$: приращение температуры в зависимости от частоты падающего света (а), приращение температуры по отношению к интенсивности падающего света (б), спектры поглощения, отражения и пропускания (в), поглощение, отражение и пропускание в зависимости от интенсивности (г)

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки № 22-22-20056.

В.Д. ЗАЙЦЕВ^{1,2}, С.С. СТАФЕЕВ^{1,2}

¹Институт систем обработки изображений РАН –
филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара

²Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева

СУПЕРПОЗИЦИЯ ПУЧКА С ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ВЕКТОРНОГО ПУЧКА В ОСТРОМ ФОКУСЕ

В работе теоретически и численно рассмотрена острая фокусировка лазерного пучка, у которого распределение поляризации в начальной плоскости представляет собой суперпозицию цилиндрического векторного пучка порядка m и однородной линейной поляризации.

V.D. ZAITSEV^{1,2}, S.S. STAFEEV^{1,2}

¹Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara

²Samara National Research University

SUPERPOSITION OF A BEAM WITH LINEAR POLARIZATION AND A CYLINDRICAL VECTOR BEAM IN A SHARP FOCUS

In this paper, we theoretically and numerically consider the sharp focusing of a laser beam whose polarization distribution in the initial plane is a superposition of a cylindrical vector beam of order m and a homogeneous linear polarization.

Цилиндрические векторные поля, в том числе высоких порядков хорошо известны [1, 2]. Они представляют собой пример неоднородно поляризованных пучков света, в сечении которых локальный вектор линейной поляризации меняет своё направление от точки к точке. Цилиндрические пучки низшего порядка называют пучками с радиальной и азимутальной поляризациями [1]. Такие пучки можно, например, формировать с помощью двух повернутых относительно друг друга полуволновых пластин [1], многосекторного поляризатора [3], метаповерхности и четвертьволновых пластинок и модулятора света. Цилиндрические векторные пучки применяются в микроманипулировании частицами, микроскопии, квантовой информатике.

Расчёт производился с помощью общих формул Ричардса-Вольфа, которые описывают свет в области фокуса:

$$\mathbf{U}(\rho, \psi, z) = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} B(\theta, \varphi) T(\theta) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \times \\ \times \exp\{ik[\rho \sin \theta \cos(\varphi - \psi) + z \cos \theta]\} \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1)$$

где $\mathbf{U}(\rho, \psi, z)$ – напряжённость электрического или магнитного поля, $B(\theta, \varphi)$ – электрическое или магнитное поле на входе широкоапертурной оптической системы в координатах выходного зрачка (θ – полярный угол, φ – азимутальный), $T(\theta)$ – функция аподизации линзы, f – фокусное расстояние, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, α – максимальный полярный угол, определяемый числовой апертурой линзы ($NA = \sin \alpha$), $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ – матрица поляризации.

С помощью применения подхода Ричардса–Вольфа показано, что при фокусировке данного начального векторного поля в плоскости фокуса формируются локальные области размером около 200 - 250 нм (длина волны 532 нм, $NA = 0,95$), в которых поляризация эллиптическая или круговая. Число таких областей связано с номером поля m . На некоторой окружности в фокусе с центром на оптической оси число таких областей равно $2m$. Заметим, что области с локальной эллиптической поляризацией возникают в фокусе только при нечётном номере m и при ненулевом параметре a . Если параметр a начального поля нулевой, то поле сводится к хорошо известному цилиндрическому векторному полю порядка m (рис. 1), у которого в фокусе при любом m имеет место только локальная линейная поляризация, и нет областей с эллиптической поляризацией.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-22-00265.

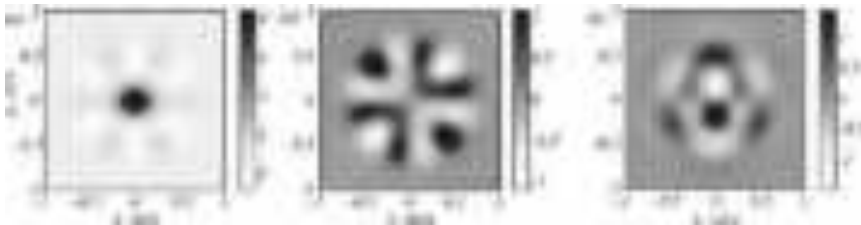


Рис. 1. Компоненты вектора Стокса s_1 (а), s_2 (б) и s_3 (в) при фокусировке векторного поля (1) третьего ($m = 3$) порядка при параметре $a = 1$

Список литературы

1. Golovashkin D.L., Kazanskiy N.L. // Math Model Comput Simulationsю 2007. V. 19. P. 48.
2. Zhan Q., Leger J.R. // Opt Express. 2002. V. 10 (7). P. 324.
3. Zhan Q. // Adv. Opt. Photon. 2009. V. 1. P. 1.

П.С. РЫЖИКОВ, В.А. МАКАРОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ВЛИЯНИЕ НЕЛОКАЛЬНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ОПТИЧЕСКОГО ОТКЛИКА СРЕДЫ НА ПОТОК УГЛОВОГО МОМЕНТА РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

Определён конкретный вид соотношения, отражающего закон преобразования суммарного углового момента $n+1$ электромагнитных волн, взаимодействующих в процессе распространения в среде с нелинейностью n -го порядка, характеризующейся локальными и нелокальными оптическими восприимчивостями. Нелокальность оптического отклика меняет вид поляризации среды, входящий в определение плотности углового момента, и делает более сложным выражение для плотности потока углового момента.

P.S. RYZHIKOV, V.A. MAKAROV

Lomonosov Moscow State University

THE IMPACT OF NONLOCAL NONLINEAR OPTICAL RESPONSE OF MEDIUM ON THE ANGULAR MOMENTUM FLUX OF PROPAGATING RADIATION

The form of relation reflecting optical angular momentum transformation of $n+1$ waves interacting during their propagation in nonlinear medium with n -th order local and nonlocal optical response was determined. The nonlocality of the optical response changes the form of polarization of medium included in the expression for the angular momentum density, and makes the expression of the angular momentum flux density more complicated.

Закон сохранения углового момента (момента количества движения) является одним из фундаментальных законов сохранения в физике. Согласно ему система, обладающая симметрией относительно вращения вокруг некоторой оси, сохраняет проекцию углового момента на эту ось. В оптике этот закон описывает связь между плотностью углового момента и плотностью потока углового момента. В последние годы большое внимание уделяется контролю изменения углового момента света в процессе его распространения. Особенно интенсивно это происходит в задачах передачи классической и квантовой информации по оптическим каналам и оптического контроля микроскопических объектов.

В средах с нелокальностью оптического отклика плотность потока импульса содержит не пропорциональное поляризации среды дополнительное слагаемое [1 - 4]. В настоящей работе обусловленные нелокальностью нелинейного оптического отклика среды дополнительные слагаемые в выражении для плотности углового момента, плотности потока углового момента и плотности вращательного момента света, связанные между собой законом изменения углового момента, получены как следствие особенностей закона сохранения импульса света в этих средах. Показано, что учёт нелокальности оптического отклика меняет только вид поляризации среды, входящий в определение плотности углового момента, тогда как определение плотности потока углового момента содержит дополнительное слагаемое, зависящее от тензора нелокальной нелинейной оптической восприимчивости n -го порядка.

Найденную поправку к плотности потока углового момента, обусловленную нелокальностью нелинейного отклика, скорее всего можно отнести к её спиновой составляющей ввиду её независимости от выбора начала координат и связи с эффектом оптической активности.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982.
2. Агранович В.М., Гинзбург В.Л. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсией и теория экситонов. М.: Наука, 1979.
3. Toptygin I.N., Levina K. // Physics-Uspekhi. 2016. V. 59 (2). P. 152.
4. Рыжиков П.С., Макаров В.А. // ЖЭТФ. 2022. Т. 162 (1). С. 45.

К.Е. АЛЕФЕРКИНА, А.Д. РЕМЗОВ, М.В. САВЕЛЬЕВ
*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СПЕКТР КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ РЕШЁТКИ ПРИ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В НАНОСУСПЕНЗИИ С УЧЁТОМ ЭЛЕКТРОСТРИКЦИИ И ПОЛЯ ТЯЖЕСТИ

Теоретически исследовано вырожденное четырёхволновое взаимодействие в наносuspензии при условии записи концентрационной решётки в результате интерференции первой волны накачки и сигнальной волны. Проведён анализ пространственного спектра решётки в зависимости от продольной координаты, поглощения среды, силы тяжести наночастиц, угла падения первой волны накачки.

K.E. ALEFERKINA, A.D. REMZOV, M.V. SAVELYEV
Samara National Research University

SPATIAL SPECTRUM OF THE CONCENTRATION GRATING AT FOUR-WAVE MIXING IN A NANOSUSPENSION TAKING INTO ACCOUNT ELECTROSTRICTION AND GRAVITY FIELD

The degenerate four-wave mixing in a nanosuspension is theoretically studied under for condition that the concentration grating is recorded as a result of the interference of the first pump wave and the signal wave. The grating spatial spectrum is analyzed depending on the longitudinal coordinate, the absorption of the medium, gravity of the nanoparticles and the incidence angle of the first pump wave

Существует широкий класс сред, в которых возможно эффективно реализовать процесс четырёхволнового взаимодействия (ЧВВ), в частности, это коллоидные растворы, эмульсии, суспензии наночастиц. Особенностью последних является наличие градиентов температуры и концентрации компонент, вследствие чего в них наблюдаются такие явления как диффузия, электрострикция, перекрёстные эффекты Соре и Дюфура.

При решении задач нелинейной адаптивной оптики необходимо знать, насколько точно соответствуют пространственные структуры сигнальной и объектной волн. К настоящему времени проведено исследование пространственной структуры объектной волны при ЧВВ в суспензии в зависимости от эффективной массы наночастиц и коэффициента

поглощения жидкости [1, 2]. При этом считалось, что вкладом изменения концентрации частиц в изменение комплексного показателя преломления можно пренебречь. Однако в работе [3] показано, что амплитуда объектной волны, образующейся в результате дифракции второй волны накачки на концентрационной решётке, вблизи нулевой пространственной частоты стремится к бесконечности. Этот результат был получен без учёта электрострикционного потока при нахождении пространственного спектра концентрационной решётки (δC).

Цель работы – анализ пространственного спектра концентрационной решётки с учётом вклада электрострикции и поля тяжести в поток наночастиц, находящихся в жидкой суспензии.

В приближении заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента преобразования с использованием условия отсутствия полного потока наночастиц [1, 4] через грани плоского слоя жидкости толщины ℓ получено аналитическое выражение для δC . Волны накачки считались плоскими, а сигнальная волна моделировалась волной от точечного источника, расположенного в плоскости $z = 0$.

Анализ показал, что при фиксированной толщине ℓ коэффициент поглощения α оказывает влияние на зависимость модуля δC от продольной координаты z на всех пространственных частотах, в то время как параметр M_z , характеризующий проекцию силы тяжести наночастиц на ось Z , – только вблизи нулевой частоты. Поведение модуля пространственного спектра объектной волны в плоскости $z = 0$, исследованного в процессе встречного ЧВВ в поглощающей суспензии в зависимости от α и M_z [5], качественно совпадает. Поворот первой волны накачки не меняет вид модуля и проявляет себя только в фазе δC . При $M_z > \alpha \ell$ в плоскостях $z = 0$ и $z = \ell$ наблюдаются наименьшее и наибольшее значения модуля δC на нулевой пространственной частоте. В отличие от работы [1] при повороте схемы ЧВВ на 180° (т.е. при $M_z < 0$) эти значения не меняются местами, что вызвано отличным от нуля поглощением среды.

Список литературы

1. Savelyev M.V., Ivakhnik V.V. // Radiophys. Quantum Electron. 2021. V. 63 (8). P. 625.
2. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2018. Т. 21. № 1. С. 5.
3. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 1. С. 6.
4. Larsson C., Kumar S. // Phys. Rev. Fluids. 2021. V. 6. P. 034004.
5. Савельев М.В., Хернандес Гонзалес Ф.А. // Сборник научных трудов XXXII Международной школы-симпозиума по голографии, когерентной оптике и фотонике. СПб.: Университет ИТМО, 2022. С. 129.

Д.В. РЯХОВСКИЙ, С.М. ПОПОВ, В.А. ИСАЕВ,
А.О. КОЛОСОВСКИЙ, В.В. ВОЛОШИН, И.Л. ВОРОБЬЁВ,
Ю.К. ЧАМОРОВСКИЙ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

МАССИВЫ ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК, ЗАПИСАННЫЕ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

В работе представлены свойства многосердцевидных оптических волокон (ОВ) с массивом волоконных брэгговских решёток (ВБР) записанных в процессе вытяжки ОВ. Обнаружено, что спектры отражения боковых сердцевин многосердцевидного ОВ, закрученного в процессе вытяжки (до 800 оборотов в минуту), имеют неожиданно широкий спектр отражения (до 2 нм на длине волны 1550 нм) по сравнению с центральной сердцевидой ОВ (типичная ширина 0,2 - 0,3 нм на длине волны 1550 нм).

D.V. RYANOVSKIY, S.M. POPOV, V.A. ISAEV, A.O. KOLOSOVSKIY,
V.V. VOLOSHIN, I.L. VOROB'EV, Yu.K. CHAMOROVSKIY

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

ARRAYS OF FIBER BRAGG GRATINGS INCRIBED DURING DRAWING PROCESS OF A MULTICORE OPTICAL FIBER

The paper presents the properties of multicore optical fibers (OF) with an array of fiber Bragg gratings (FBG) inscribed during drawing process. It was found that the reflectance spectra of the outer cores of a multicore OF spun during drawing (up to 800 rpm) have an unexpectedly wide reflectance spectrum (up to 2 nm at the wavelength of 1550 nm) compared to OF's central core (typical width 0.2 - 0.3 nm at $\lambda = 1550$ nm).

Новым направлением волоконно-оптических сенсорных систем для медицинского применения стал датчик формы [1] на основе многосердцевидного ОВ с массивом ВБР записанных поточно. В данной работе показаны результаты исследования образцов многосердцевидных ОВ с массивом ВБР. Запись массивов производится во время процесса вытяжки ОВ с помощью УФ-лазера через фазовую маску [2]. Количество ВБР на ста метрах такого ОВ может достигать 10000 штук. Увеличение обратного сигнала по сравнению с уровнем рассеяния Рэлея достигает 50 дБ на $\lambda = 1550$ нм. Для записи массива ВБР во время процесса вытяжки

использовалась многосердцевинная заготовка, сделанная из отдельных заготовок методом перетяжки. Сердцевины были изготовлены из германатного стекла. Скорость вытяжки ОВ – 6 м/мин. Скорость вращения заготовки до 200 - 800 об/мин. Фотография многосердцевинного ОВ показана на рис. 1. Расстояние между отдельными сердцевинами – 35 мкм. Разница п.п. сердцевина – оболочка 0,03. Период фазовой маски – 1070 нм. Измерения выполнялись методом частотной рефлектометрии (OFDR LUNA 4600) как для центральной сердцевины, так и для боковых (закрученных) сердцевин. Такая стыковка достигалась с помощью поляризационного сварочного аппарата Fujikura FSM-100P.

Спектр отражения центральной и одной из боковых сердцевин показан на рис. 2. Спектр отражения центральной сердцевины типичен для массивов ВБР ранее полученных во время процесса вытяжки [2] и составляет 0,3 нм на длине волны 1553 нм. Спектр отражения боковой сердцевины имеет ширину около 1,2 нм в области длин волн 1553 - 1554 нм. Максимально достигнутая ширина спектра отражения массива ВБР – 2 нм при скорости вращения вытягиваемой заготовки 800 об/мин.

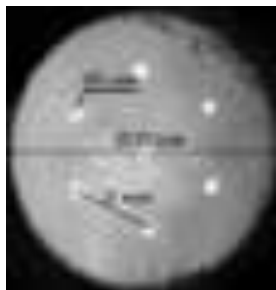


Рис. 1. Фотография многосердцевинного ОВ, закрученного во время вытяжки



Рис. 2. Спектр отражения ОВ (200 об/мин):
1 – центральная жила (сплошная линия),
2 – боковая жила (пунктирная линия)

По мнению авторов, данные результаты требуют дальнейшего исследования, поскольку данные ОВ перспективны для применения в оптико-волоконных датчиках и оптических процессорах [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Moore J.P., Rogge M.D. // Optics Express. 2012. V. 20 (3). P. 2967.
2. Popov S.M., Butov O.V., et al. // Proc. of PIERS Spring 2017. 2017. P. 1568.
3. Zhao Z., Dang Y., Tang M. // Photonics. 2022. V. 9 (6). P. 381.

В.А. КУЛИКОВА, С.В. ВАРЖЕЛЬ, А.А. ДМИТРИЕВ, В.В. САВИН,
В.А. КЛИШИНА, Д.В. КАЛЯЗИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СПОСОБ ПАССИВНОЙ ТЕРМОКОМПЕНСАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследования способов пассивной температурной компенсации волоконных брэгговских решёток (ВБР). В ходе проведения работы были рассмотрены различные способы реализации указанной операции, а также проведён анализ спектральных откликов решёток в разработанном атермальном корпусе и без при изменении температуры.

V.A. KULIKOVA, S.V. VARZHEL, A.A. DMITRIEV, V.V. SAVIN,
V.A. KLISHINA, D.V. KALYAZINA
ITMO University, Saint-Petersburg

METHOD FOR PASSIVE THERMAL COMPENSATION OF OPTICAL PARAMETERS OF FIBER BRAGG GRATING

The results of theoretical and experimental studies of methods of passive temperature compensation of fiber Bragg gratings (FBGs) are presented. In the course of the work, various methods for implementing this operation were considered, as well as an analysis of the spectral responses of the gratings in the developed athermal packaging and without when the temperature changed.

Волоконные брэгговские решётки имеют высокую степень значимости в телекоммуникационной сфере, в частности ВБР применяются как спектрально-селективные элементы в системах со спектральным уплотнением. В области волоконно-оптической сенсорики некоторые измерительные системы используют ВБР для калибровки. Для вышеперечисленных применений сдвиг длины волны Брэгга даже на 100 пм в результате температурной зависимости оптических параметров решётки может быть критичным для работы устройства или вносить ошибку в результат измерения. Существует два способа температурной компенсации ВБР: активный и пассивный. Применение активного метода реализуют с помощью установки решётки на элемент Пельтье, данный метод компенсации требует использования дополнительного оборудования [1]. Кроме того, термокомпенсацию можно осуществить,

добавляя в систему измерения на основе ВБР дополнительный сенсор температуры. Таким образом, результатом измерений является значение длины волны брэгговского резонанса с учётом показаний дополнительного датчика температуры [2]. Пассивная температурная компенсация основана на изменении деформации решётки с использованием пассивной опоры, состоящей из нескольких материалов с разными коэффициентами теплового расширения (КТР).

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование методик пассивной термокомпенсации ВБР с помощью корпусирования, где за основу взяты зависимость оптических параметров решётки от механической деформации и температурное расширение элементов корпуса. На волокно с записанной на нем решёткой надевались две металлические трубочки с высоким КТР, далее конструкция помещалась в капилляр с КТР меньше, чем у трубочек, и закреплялась так, чтобы волокно было под натяжением. Таким образом, при увеличении температуры, алюминиевые капилляры расширялись, снимая изначальное натяжение волокна, необходимое для температурной компенсации ВБР.

В ходе экспериментальной работы получены температурные зависимости центральной длины волны Брэгга обычной решётки и решётки в разработанном атермальном корпусе (рис. 1). Неравномерность показаний по длине волны брэгговского резонанса составила 70 пм в диапазоне температуры [-15; 105] °С.

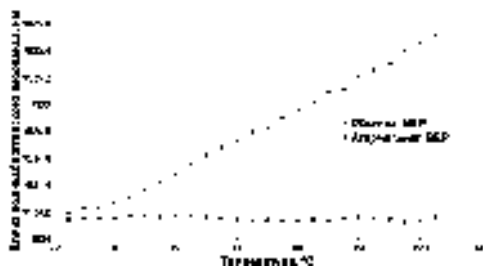


Рис. 1. Зависимость длины волны брэгговского резонанса от температуры для обычной и атермальной решётки

Список литературы

1. Chang Y.-T., et al. Using a fiber loop and fiber Bragg grating as a fiber optic sensor to simultaneously measure temperature and displacement // *Sensors (Basel)*. 2013. V. 13. No. 5. P. 6542-6551.
2. Diaz C.A.R., et al. Liquid level measurement based on FBG-embedded diaphragms with temperature compensation // *IEEE Sensors Journal*. 2018. V. 18. No. 1. P. 193-200.

В.П. ЦЫПКИН, А.Ю. ОСТАПИВ, Г.Ю. ИВАНОВ,
И.А. ЛАРИОНОВ, В.А. ТЫРТЫШНЫЙ
НТО «ИРЭ Полус», Фрязино

**ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТОВ МЕЖМОДОВОГО
И ОДНОМОДОВОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО СМЕШЕНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В МАЛОМОДОВОМ
ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ**

Представлено исследование взаимного влияния двух нелинейно-оптических эффектов: межмодового четырёхволнового смешения (ММЧВС) в области длин волн 1 мкм и одномодового ЧВС (ОМЧВС) между спектральными компонентами 1 и 1.5 мкм при распространении оптических импульсов наносекундной длительности на указанных длинах волн в маломодовом оптическом волокне. В процессах ММЧВС и ОМЧВС генерируются антистоксовы компоненты на длине волны 1005 нм, что приводит к взаимному влиянию эффектов и ограничению максимальной длины волокна доставки.

V.P. TSYPKIN, A. Yu. OSTAPIV, G. Yu. IVANOV, I.A. LARIONOV,
V.A. TYRTYSHNYY
IRE-Polus Corporation, Fryazino

**MUTUAL INFLUENCE OF THE INTERMODE
AND FUNDAMENTAL-MODE FOUR-WAVE MIXING
OF OPTICAL PULSES IN A FEW-MODE OPTICAL FIBER**

A study of the mutual influence of two nonlinear optical effects is presented: intermode four-wave mixing (IMFWM) in the wavelength range of 1 μm and fundamental-mode FWM (FMFWM) between spectral components of 1 and 1.5 μm during the propagation of nanosecond optical pulses at these wavelengths in a few-mode optical fiber. The processes of IMFWM and OMFWM have a common anti-stokes component at a wavelength of 1006 nm, which leads to mutual effects and limitation of the maximum length of the delivery fiber.

При распространении мощного лазерного излучения по оптическому волокну, в частности, имеет место эффект четырёхволнового смешения (ЧВС). Важным условием его эффективного протекания является реализация фазового синхронизма [1]. В маломодовых оптических волокнах данное условие может быть реализовано за счёт взаимодействия пар фотонов, распространяющихся в различных поперечных модах

волокна [2]. Такой процесс называется многомодовым ЧВС (ММЧВС). В случае взаимодействия одинаковых поперечных мод волоконного световода (прежде всего основных мод LP_{01}) процесс называется одномодовым ЧВС (ОМЧВС).

Целью работы было продемонстрировать и объяснить одновременное развитие ММЧВС и ОМЧВС при распространении мощного импульсного лазерного излучения на длинах волн 1032 и 1562 нм по маломодовому оптическому волокну и взаимное влияние эффектов.

Методика экспериментального исследования процессов ЧВС основана на измерениях спектрального и модового составов излучения при различных длинах оптического волокна для синхронизированных и несинхронизированных оптических импульсов. Показано, что в исследуемом волокне имеет место ММЧВС с образованием излучения на длине волны 1060 нм в моде LP_{11} , причём синхронизация с импульсами на длине волны 1562 нм приводит к росту на 16 дБ спектрального пика на длине волны 1060 нм (рис. 1).

Разработана математическая модель распространения оптических импульсов по маломодовому волокну, основанная на решении системы связанных уравнений для амплитуд [1]. По результатам расчёта спектры коэффициентов усиления антистоксовых компонент процессов ММЧВС и ОМЧВС имеют пересечение в области 1005 нм, и при синхронном распространении импульсов с длинами волн 1032 и 1562 нм спектральная интенсивность антистоксового пика на длине волны 1005 нм увеличивается на 20 дБ по сравнению со случаем распространения несинхронизированных оптических импульсов.

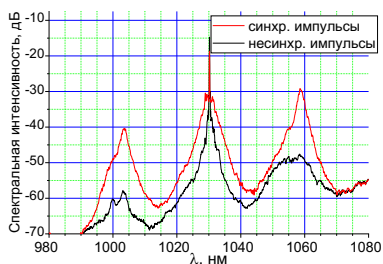


Рис. 1. Спектр излучения в случае синхронизированных (красный) и несинхронизированных (чёрный) оптических импульсов

Список литературы

1. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. Berlin: Springer-Heidelberg, 2000.
2. Fève J.P., et al. Four-wave mixing in nanosecond pulsed fiber amplifiers // Optics Express. 2007. V. 15. No. 8. P. 4647-4662.

Н.А. УШАКОВ, Т.А. МАКОВЕЦКАЯ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СПЕКТРАЛЬНАЯ БИФОТОННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ В ЗАДАЧАХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И КОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

В работе теоретически рассматривается интерференция бифотона в случае различных конфигураций интерферометров в контексте задачи измерения разности оптических путей интерферометра. Проанализированы свойства сигнала бифотонной интерференции при сканировании разности центральных частот спутанных фотонов, продемонстрировано преимущество предложенного спектрального подхода по сравнению с традиционной бифотонной интерферометрией и классической интерферометрией.

N.A. USHAKOV, T.A. MAKOVETSKAYA

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

SPECTRAL-DOMAIN BIPHOTON INTERFERENCE APPLIED TO FIBER-OPTIC SENSORS AND OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

The biphoton interference in the case of different configurations of interferometers is considered in the context of measuring the optical path difference of the interferometer by means of theoretical analysis. The properties of the biphoton interference signal when scanning the difference in the central frequencies of entangled photons are analyzed, and the advantage of the proposed spectral approach in comparison with traditional biphoton interferometry and classical interferometry is demonstrated.

Эффект интерференции бифотонов имеет широкий спектр применений, включая высокоточные оптические измерения [1], обработку квантовой информации [2] и ряд других. Одним из наиболее активно исследуемых применений является повышение разрешающей способности различных методов имаджинга. Например, оптическая когерентная томография (ОКТ) [3], позволяющая неинвазивно получать трёхмерные изображения прозрачных и полупрозрачных объектов, может быть модифицирована путём замены классического широкополосного источника света на источник бифотонов и регистрации интерференционного сигнала при помощи детекторов одиночных фотонов. Результирующая квантовая ОКТ [4] обладает улучшенной

пространственной разрешающей способностью и при ряде условий нечувствительна к дисперсии образца.

В данной работе предложен новый принцип спектральной квантовой интерферометрии, при этом интерферометрический сигнал формируется за счёт сканирования разности центральных частот спутанных фотонов. Соответствующие источники бифотонов реализовывались в ряде работ [5]. При этом совместное спектральное распределение фотонов (совместная спектральная амплитуда бифотона) может описываться суммой двух отдельно расположенных двумерных гауссовых пиков, как показано на рис. 1. За счёт коррелированных флуктуаций частот фотонов в пределах антидиагональной ширины совместной спектральной амплитуды предложенный подход подвержен негативному влиянию дисперсии исследуемого образца на разрешающую способность в гораздо меньшей степени, чем классические интерферометрические методы [6]. Кроме того, преимуществом спектрального подхода квантовой интерферометрии по сравнению с традиционной квантовой интерферометрией является улучшенная пространственная разрешающая способность.

Также теоретически показано, что в приложениях измерения микроперемещений предложенный спектральный подход обеспечивает большую устойчивость к шумам однофотонных детекторов, чем традиционная квантовая интерферометрия [7].



Рис. 1. Схема спектральной квантовой ОКТ (слева), пример сигнала бифотонной интерференции (справа сверху) и его преобразования Фурье (справа снизу)

Список литературы

1. Hong C.K., Ou Z.Y., Mandel L. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 59 (18). P. 2044.
2. Knill E., Laflamme R., Milburn G.J. // Nature. 2001. V. 409 (6816). P. 46.
3. Huang D., Swanson E.A., et al. // Science. 1991. V. 254 (5035). P. 1178.
4. Nasr M.B., Saleh B.E., Sergienko A.V., Teich M.-C. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 91 (8). P. 8.
5. Chen Y., Fink M., Steinlechner F., Torres J.P., Ursin R. // npj Quantum Inf. 2019. V. 5. P. 43.
6. Ushakov N.A., Makovetskaya T.A., Markvart A.A., Liokumovich L.B. // JETP Lett. 2023. V. 117 (1).
7. Ushakov N.A., Markvart A.A., Liokumovich L.B. // JOSA B. 2022. V. 39 (11). P. 2905.

А.А. ЧУВЫЗГАЛОВ^{1,2}, Д.Г. ГИЛЕВ², В.В. КРИШТОП^{1,2,3}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет

²Пермская научно-производственная приборостроительная компания

³Пермский государственный национальный исследовательский университет

МИНИАТЮРНЫЙ МАГНИТОМЕТР НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

В работе представлен волоконно-оптический магнитометр, основанный на эффекте Фарадея. Обычно при использовании катушки с волокном в датчиках угловых скоростей мешающим фактором является вращение Земли, наводящее дополнительную разность фаз за счёт эффекта Саньяка. В представленной схеме предполагается использование данного эффекта и последующего его усиления для создания миниатюрного магнитометра с точностью порядка 10^{-10} Тл.

A.A. CHUVYZGALOV^{1,2}, D.G. GILEV², V.V. KRISHTOP^{1,2,3}

¹Perm National Research Polytechnic University

²Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company

³Perm State University

FIBER OPTICAL CURRENT SENSOR

The paper presents a fiber-optic magnetometer based on the Faraday effect. Usually, when using a coil with fiber in angular velocity sensors, the interfering factor is the rotation of the Earth, which induces an additional phase difference due to the Sagnac effect. The presented scheme assumes the use of this effect and its subsequent amplification to create a miniature magnetometer with an accuracy of about 10^{-10} Tl.

Измерение магнитного поля при помощи волоконной оптики возможно из-за эффекта Фарадея – магнитооптического эффекта, заключающегося в том, что при воздействии магнитного поля на линейно-поляризованный свет происходит вращение плоскости поляризации света [1].

При воздействии магнитного поля на световую волну с круговой поляризацией изменяется фазовая скорость этой волны. Если сравнивать между собой две противоположные волны (как по направлению самой волны, так и по направлению вращения светового вектора) то по разнице фаз можно судить о величине воздействующего магнитного поля [2].

Для измерения сдвига фазы в волоконно-оптическом магнитометре стандартно применяется интерферометрическая схема волоконно-оптического интерферометра Саньяка. Мы предлагаем заменить волоконную катушку длиной в 1 км на оптический резонатор с меньшей

длиной контура, порядка 10 м, а также применить в схеме волоконный разветвитель 3 x 3 для детектирования разности фаз в чувствительной части с помощью пассивного внесения разности фаз между двумя каналами. Это приводит на выходе к зависимости интенсивности света синусоидальной формы. В такой схеме, воздействуя на волоконно-оптическую катушку проводником с током, можно изменять значение угловой скорости, тем самым судить об изменении магнитного поля. Схема данной установки приведена на рис. 1).



Рис. 1. Схема волоконно-оптического интерферометра Саньяка:
1 – блок обработки, 2, 4 – детекторы, 3 – источник излучения,
5, 6 – волоконные делители, 7 – обмотка

Информация, полученная с блока обработки в виде значения угловой скорости, может быть пересчитана в значениях магнитного поля по формуле:

$$B_1 = \frac{\pi D}{\lambda c V} \Omega ,$$

где D – диаметр катушки, λ – рабочая длина волны, c – скорость света, V – постоянная Верде, Ω – измеряемая угловая скорость.

Используя намотку проводника с током на волоконно-оптическую катушку, можно, тем самым, смотреть за изменением фазы, варьируя током. Представленная схема позволяет создать миниатюрный магнитометр, измеряющий поле с точностью порядка 10^{-10} Тл.

Список литературы

1. Wang Z., et al. Closed-loop method based on faraday effect in resonant fiber optic gyro employing a low coherence-noise resonator // Journal of Lightwave Technology. 2021. V. 39. No. 21. P. 6994-7000.
2. Lefevre H.C. The fiber-optic hyroscope. London: Artech house, 2022.

Д.П. СУДАС, Г.Г. ЯКУЩЕВА, П.И. КУЗНЕЦОВ
*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ОПТОВОЛОКОННЫЙ РЕФРАКТОМЕТР НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ ОЛОВА И ТИТАНА

С использованием технологии металлоорганического химического осаждения из паровой фазы (MOCVD) были получены и исследованы полностью волоконные рефрактометры на основе резонанса мод затухания (LMR). Датчики изготовлены на основе отрезка оптического многомодового волокна, протравленного до сердцевины с нанесёнными на боковую поверхность плёнками диоксида титана (TiO_2) и двухслойного покрытия ($\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$). Сравняется чувствительность полученных сенсоров к показателю преломления окружающей жидкой среды в зависимости от состава и толщины плёночного покрытия. Двухслойное покрытие улучшает стабильность показаний рефрактометра, но уменьшает чувствительность. Чувствительность волоконного датчика с двухслойным покрытием в диапазоне длин волн 1,33 - 1,35 мкм составила 4850 нм / единицу показателя преломления.

D.P. SUDAS, G.G. YAKUSCSHEVA, P.I. KUZNETSOV
Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

FIBER-OPTIC REFRACTOMETER BASED ON MULTILAYER COATINGS OF TIN AND TITANIUM OXIDES

Using metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) technology, all-fiber refractometers based on extinction mode resonance (LMR) have been produced and investigated. The sensors are made on the basis of a segment of an optical multimode fiber etched to the core with titanium dioxide (TiO_2) and tin ($\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$) films deposited on the side surface. The sensitivity of the obtained sensors to the refractive index of the surrounding liquid medium is compared depending on the composition and thickness of the film coating. A tin oxide coating over titanium oxide improves the stability of the refractometer readings, but reduces the sensitivity. The sensitivity of the fiber sensor with a two-layer coating in the wavelength range of 1.33 - 1.35 μm was 4850 nm/RIU.

Часть энергии, распространяющаяся по волокну за пределами сердцевины, называется эванесцентным полем [1]. Если на боковую поверхность утончённого отрезка волокна нанести слой оптически прозрачного материала с высоким показателем преломления, то в

результате в спектре пропускания в определённом диапазоне длин волн появляется провал с чётко выраженным экстремумом (резонанс затухающей моды) [2]. Положение и глубина резонанса зависят от показателей преломления нанесённого слоя и окружающей среды, а также материала покрытия и его толщины.

Подготовив серию утонённых многомодовых волокон с диаметром около 23 мкм и длиной 3,5 мм, на их поверхность были синтезированы покрытия TiO_2 и $\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$ таким образом, чтобы резонанс находился на максимально близких длинах волн. Спектры пропускания покрытий для детектирования края фундаментального поглощения показаны на рис. 1. Испытания на чувствительность полученных образцов проводились с использованием низких концентраций соляной кислоты ($\leq 1\text{M}$).

Из представленных данных видно, что в исследованном диапазоне показателей преломления двухслойный сенсор показывает наивысшую чувствительность по сравнению с аналогами, упоминаемыми в литературе [3]. Тем не менее, его чувствительность меньше (рис. 2), чем у сенсора с одинарным покрытием TiO_2 . Это уменьшение связано с уменьшением шероховатости и уменьшением площади взаимодействующего покрытия. Однако испытания многократным заливанием дистиллированной водой показали, что полученный датчик так же стабилен, как и датчик на основе оксида олова.

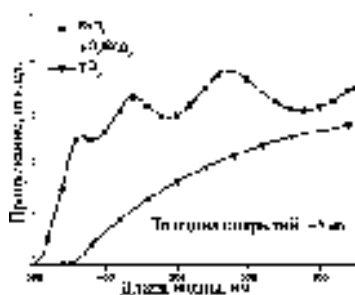


Рис. 1. Спектры пропускания в видимом диапазоне длин волн

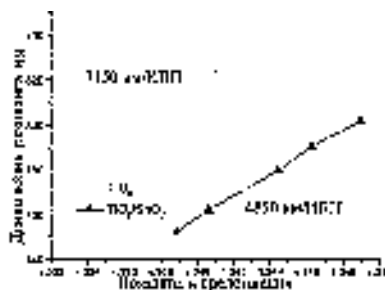


Рис. 2. Сдвиг положения резонанса в зависимости от показателя преломления водных растворов HCl

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00259.

Список литературы

1. Henry W.M. // Proc. SPIE. 1994. V. 2293.
2. Arregui F.J., et al. // Sens. Actuators B. 2016. V. 232, P. 660-665.
3. Imas J.J., et al. // Opt. Lett. 2021. V. 46. P. 3284-3287.

В.А. КОМИСАРОВ, А.А. ДМИТРИЕВ, С.В. ВАРЖЕЛЬ,
А.И. КОЗЛОВА, А.Л. ВОЛОШИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ АКТИВНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА, ЛЕГИРОВАННОГО ЭРБИЕМ

Приведены результаты экспериментов по получению спектра и времени жизни флуоресценции в активном оптическом волокне, легированном эрбием. Разработан лабораторный стенд для исследования зависимости времени жизни флуоресценции от мощности излучаемого активным волокном сигнала.

V.A. KOMISAROV, A.A. DMITRIEV, S.V. VARZHEL,
A.I. KOZLOVA, A.L. VOLOSHINA
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF SPECTRAL AND TEMPORAL FLUORESCENCE CHARACTERISTICS OF ERBIUM DOPED OPTICAL FIBERS

The results of experiments to study the spectrum and lifetime of fluorescence in the erbium doped optical fiber are presented. A laboratory set-up was developed to study the dependence of the fluorescence lifetime on the power of the signal emitted by the active fiber.

Активное оптическое волокно (ОВ), легированное эрбием, представляет большой интерес, потому что флуоресцирует в третьем окне прозрачности оптического волокна, которое сейчас используется в телекоммуникационных оптоволоконных сетях. Из-за своих свойств активное ОВ находит применение в пассивных квантовых усилителях для волоконно-оптических линий связи, а также такое волокно применяется в области сенсорики [1 - 4].

Известно, что активное оптическое волокно флуоресцирует с определённым временем. Время жизни флуоресценции может различаться у аналогичных волокон разных производителей. Данный параметр важно учитывать при разработке различных устройств, например, квантовых усилителей. Таким образом, необходимо разработать стенд, с помощью которого можно исследовать время жизни флуоресценции различных волокон.

Для исследования зависимости времени жизни и спектральных характеристик флуоресценции используется схема, в которой участки активного оптического волокна Fiberscore 1-12(980/125) и 1-25(980/125) подвариваются к стандартному ОВ. Для ввода лазерного излучения в активное оптическое волокно используется оптический фильтрующий мультиплексор сигнала FWM 1480/1550, к одному концу которого присоединён участок активного ОВ, а к двум другим лазерный источник накачки на 1480 нм и регистрирующее устройство.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. С помощью лазерного источника в один конец мультиплексора вводится излучение, затем оно попадает в участок активного оптического волокна. Оно флуоресцирует на длине волны $\sim 1,53$ мкм. Затем излучение активного ОВ попадает обратно через мультиплексор на регистрирующее устройство, в качестве которого выступает фотодиод или анализатор спектра.

В результате экспериментального исследования получены зависимости времени жизни флуоресценции активного оптического волокна от мощности излучаемого сигнала, а также спектр флуоресценции активного ОВ.

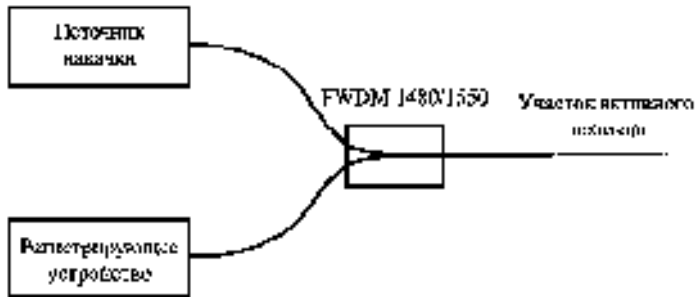


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Список литературы

1. Forsyth D.I., Sun T., et al. // Review of Scientific Instruments. 2003. V. 74. P. 5212-5218.
2. Zhang Z.Y., Grattan, et al. // Review of Scientific Instruments. 1997. V. 68. P. 2764-2766.
3. Kir'yanov A.V., Barmenkov Y.O., et al. // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2013. V. 49. P. 511-521.
4. Wade S.A., Forsyth D.I., et al. // Measurement and Control. 2001. V. 34. P. 175-178.

А.В. САЕЧНИКОВ, Э.А. ЧЕРНЯВСКАЯ, В.А. САЕЧНИКОВ
Белорусский государственный университет, Минск

МАТРИЦА АКТИВНЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АНТИТЕЛ-МАРКЕРОВ

Приведены результаты экспериментов по разработке, формированию и применению матриц активных оптических микрорезонаторов для регистрации антител-маркеров. Детектирование биохимических маркеров с использованием матриц активных микрорезонаторов обеспечивается анализом сенсорных данных методами машинного обучения.

A.V. SAETCHNIKOV, E.A. TCHERNIAVSKAIA, V.A. SAETCHNIKOV
Belarusian State University, Minsk

MATRIX OF ACTIVE MICRORESONATORS FOR MULTICHANNEL DETECTION OF ANTIBODY MARKERS

The experimental results on design, development and application of the matrices with active optical microresonators for detection of the antibody markers are discussed. Detection of biochemical markers using active microresonator matrices is provided by analysis of sensing data using machine learning methods.

Методы оптического детектирования относятся к наиболее эффективным способам определения параметров биохимических объектов. Один из интенсивно исследуемых подходов основывается на явлении резонанса мод шепчущей галереи, возникающего в кольцевых микроструктурах [1]. Активация микрорезонаторов позволяет компенсировать потери на поглощение в среде микрорезонатора при распространении волны и обеспечивается путём внедрения фотоактивных частиц в раствор fotocувствительного материала. При обеспечении достаточной накачки оптического излучения в полосе поглощения фотоактивных элементов обеспечивается режим генерации излучения и формируется матрица микролазеров.

За основу отдельного элемента измерительной матрицы выбран полимерный тороидальный микрорезонатор изготавливаемый из предварительно смешанного с флуоресцентным красителем Родамин 6G материала SZ2080. Облучение материала производилось посредством двухфотонной полимеризации на основе схемы с фемтосекундной

импульсной лазерной системы [2]. Численное моделирование распространения электромагнитного поля в микрорезонаторе было выполнено для оптимизации геометрии датчика с целью достижения коэффициента добротности 10^5 . По сравнению с планарными микрорезонаторами для микротороида обеспечивается возможность точной настройки условий связи, оптимизации модового объёма и улучшенной чувствительности. объёма и улучшенной чувствительности. На единой подложке формируются до девяти функциональных групп, каждая из которых состоит из 100 микрорезонаторов. Для обеспечения стабильности условий возбуждения резонанса, отбора преимущественной моды и увеличения нагруженной добротности резонаторы переносятся на подложку с гомогенным слоем полимера в низком показателем преломления. Схема связи на основе оптической призмы была использована для возбуждения резонанса в матрице микротороидов расположенных на единой подложке. Наблюдение сигнала осуществляется с помощью камеры, которая регистрирует интенсивность, излучаемую микрорезонаторами.

Для количественной оценки внешних возмущений были разработаны подходы, основанные на методах машинного обучения, с использованием сетей обратного распространения ошибки [3] и сетей с длинной краткосрочной памятью [4]. Первый тип сети применяется для построения регрессионной модели по стационарным состояниям резонаторов, второй для классификации динамических процессов в процессе их регистрации. Поиск оптимального решения для обеспечения высокой точности прогнозирования выполняется в два этапа, где на первом оптимизируется набор микрорезонаторов, из которого исключаются слабо вариативные. На втором – производится оптимизация сложности архитектуры сети. На основе данных регистрации динамических процессов с временным градиентом показателя преломления с относительной разницей в промежуточных значениях $\sim 10^{-4}$ мы могли продемонстрировать принятие решения о концентрации поступающего антитела-маркера с точностью $> 99\%$ и в четыре раза быстрее, чем требуется для наблюдения стационарного состояния.

Список литературы

1. Saetchnikov A.V., et al. // IEEE Sensors Journal. 2019. V. 19 (17). P. 7644-7651.
2. Saetchnikov A.V., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38 (8). P. 2530-2538.
3. Saetchnikov A.V., et al. // Opto-Electronic Advances. 2020. V. 3 (11). P. 200048.
4. Saetchnikov A.V., et al. // Advanced Photonics Research. 2021. V. 2 (12). P. 2100242.

А.Н. ДАНИЛИН^{1,2}, Н.М. КОНДРАТЬЕВ¹, К.Н. МИНЬКОВ¹

¹*Российский квантовый центр, Сколково*

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИНЖИНИРИНГ ДИСПЕРСИИ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ НАНЕСЕНИЕМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТЬ

Описано влияние неравномерности образующей микрорезонатора с модами типа шепчущей галереи на его дисперсионные характеристики. Показано, что наличие неравномерности на поверхности влияет на параметры дисперсии, а также может приводить к эффекту расщепления формы оптической моды.

A.T. DANILIN^{1,2}, N.M. KONDRATYEV¹, K.N. MIN'KOV¹

¹*Russian Quantum Center, Skolkovo*

²*Lomonosov Moscow State University*

MICRORESONATORS DISPERSION ENGINEERING BY SURFACE IRREGULARITY VIOLATION

The influence of the non-uniformity of the optical microresonator's generatrix on the value of the total dispersion has been studied. It's shown that the presence of nonuniformity on the surface affects the dispersion parameters, and can also lead to the effect of splitting the mode shape in microresonators.

Оптические микрорезонаторы (ОМР) обладают следующими основными дисперсионными характеристиками: частота основной моды ω_μ , расстояние между соседними модами $\Delta\omega$ и суммарная дисперсия D_Σ , характеризующая отклонение частот спектральных линий от эквидистантности [1]. Дисперсия электромагнитных волн является важнейшим фактором, влияющим на характеристики оптических генерируемых в ОМР частотных гребёнок [2, 3].

Из-за дисперсии моды одного порядка не являются эквидистантными. Частота резонанса ω_μ и может быть представлена в виде ряда Тейлора

$$\omega_\mu = \omega_0 + D_1\mu + D_2\mu^2/2! + D_3\mu^3/3! + \dots = \omega_0 + D_1\mu + D_\Sigma,$$

где $\mu = m - m_0$ – относительный номер моды. Наличие близкой к нулю аномальной дисперсии является необходимым условием генерации солитонной гребёнки, однако, большая по абсолютной величине дисперсия ограничивает её ширину.

При моделировании необходимо учитывать как дисперсию материала, так и геометрическую дисперсию, обусловленную размерами и формой ОМР [4, 5]. Для расчёта изменения расстояния между модами из-за дисперсии с помощью нужно определить эффективный показатель преломления n , а затем эффективный номер моды $m_{\text{eff}} = 2\pi R_n(\lambda)/\lambda$. Суммарная дисперсия определяется как $D_{\Sigma} = \omega_{\mu} - \omega_0 - D_1\mu$. Для расчёта D_{Σ} были использованы следующие основные параметры, которыми можно описать тороидальный ОМР с неравномерностью: радиус R и радиусом кривизны образующей r , радиус неоднородности R_H , её глубина H и смещение Z (рис. 1а). Расчёт характеристик ОМР был выполнен с помощью COMSOL Multiphysics. На рис. 1б и 1в приведены расчёты зависимости изменения суммарной дисперсии ОМР из CaF_2 для частоты 192 ТГц с параметрами $r = 100$ мкм при добавлении тороидального углубления глубиной 10 мкм и радиусом $R_H = 10$ мкм без смещения от экватора.

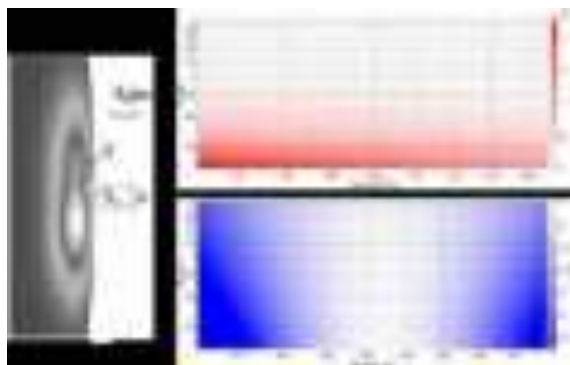


Рис. 1. Распространение моды в приповерхностном слое ОМР с неравномерностью образующей (а); расчёт изменения дисперсии микрорезонатора при добавлении неоднородности поверхности с $H = 3,0$ мкм, $Z = 2$ мкм и $R_H = 100$ мкм (б) и (в)

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 21-72-00132). А.Н. Данилин является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

Список литературы

1. Городецкий М.Л. Оптические микрорезонаторы с гигантской добротностью. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011.
2. Strekalov D.V., Marquardt C., et al. // Journal of Optics. 2016. V. 18. P. 123002.
3. Ganin D.V., Obidin A.Z., et al. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P.67-73.
4. Fujii S., Tanabe T. // Nanophotonics. 2020. P. 1087-1104.
5. Riemensberger J., Hartinger K., et al. // Optics Express. 2012. V. 20. P. 27661-27669.

А.В. ШУЛЬГА, И.В. ШИЛОВА

Белорусско-Российский университет, Могилёв, Беларусь

БРЮСТЕРОВСКИЕ ПРИЗМЫ СВЯЗИ ДЛЯ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ВОЛНОВОДНЫХ МОД

Представлены призмы связи для внутрирезонаторного возбуждения TE и TM волноводных мод в плоских диэлектрических волноводах. Данные призмы связи позволяют проводить регистрацию угловых спектров отражения внутрирезонаторного излучения лазеров без разъюстировки резонатора. Входные-выходные грани призмы располагаются под углом Брюстера к отражённому от основания призмы излучению, что позволяет их применять в случае лазеров с малым коэффициентом усиления.

A.V. SHULGA, I.V. SHILOVA

Belarusian-Russian university, Mogilev, Belarus

BREWSTER COUPLING PRISMS FOR THE INTRACAVITY EXCITATION OF GUIDED MODES

Coupling prisms for the intracavity excitation of TE and TM guided modes in planar dielectric waveguides are presented. These coupling prisms provide registration of the angular reflection spectra of laser intracavity radiation from the prism base without misalignment of the cavity. The input-output faces of the prism are oriented under the Brewster angle to the reflected radiation, which allows one to apply them in the case of low gain lasers.

В основе методов внутрирезонаторной волноводной спектроскопии [1] лежат законы взаимодействия внутрирезонаторного излучения с волноводными планарными волноводами. Возбуждение волноводных мод в данном случае обеспечивается брюстеровской призмой связи двукратного полного внутреннего отражения, конструкция которой представлена в данной работе. Классические призмы связи, которые используются в спектроскопии волноводных мод, не подходят для регистрации угловых спектров отражения внутрирезонаторного излучения, так как при однократном отражении вращение призмы связи приводит к разъюстировке резонатора. Вторая причина малой пригодности классических треугольных равнобедренных призм состоит в том, что потери на отражение на входных-выходных гранях призмы могут

превышать усиление лазера, что исключает генерацию излучения. Первая проблема была решена выполнением призмы в виде параллелепипеда [2, 3], в котором излучение лазера претерпевает двукратное полное внутреннее отражение. При этом угловое положение выходного излучения не меняется при повороте призмы. Задача минимизации потерь на отражение решалась ориентацией входных-выходных граней призмы под углом Брюстера.

На рис. 1 показаны схемы призм связи для внутриврезонаторного возбуждения волноводных мод. Внутриврезонаторное излучение преломляется на входных-выходных гранях 2 призмы 1. Далее излучение падает на основание призмы, к которому через воздушный зазор прижимается планарный диэлектрический волновод 3. Основное отличие ТЕ- и ТМ-призм заключается в ориентации входных-выходных граней. В ТМ-призме нормаль к входной-выходной грани призмы лежит в одной плоскости с нормалью к основанию призмы, а в случае ТЕ-призмы входная грань призмы повёрнута вокруг падающего луча на 90° , что делает эту призму более сложной в изготовлении. Также следует отметить, что материал для изготовления призмы должен отвечать требованиям минимальных оптических потерь, а также относительно высоким показателем преломления, большим, чем эффективный показатель преломления соответствующей волноводной моды.



Рис. 1. Призмы связи для внутриврезонаторного возбуждения ТМ и ТЕ волноводных мод

Список литературы

1. Shulga A.V., Khomchenko A.V., et al. // Technical Physics Letters. 2018. V. 44 (11). P. 953-955.
2. Shulga A.V. // Appl. Opt. 2020. V. 59, P. 3992-3994.
3. Shulga A.V., Shilova I.V. // Optics Continuum. 2022. V. 1. P. 63-67.

Р. СИНГХ

Самозанятый исследователь, Москва

ВОЗМОЖНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ КВАНТОВОГО ФАНТОМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ

Теоретически рассмотрена возможность формирования квантовых фантомных изображений с помощью направленного ответвителя в случае, когда линейный и нелинейный волноводы взаимодействуют и расположены параллельно. Изучены квантовые корреляционные характеристики, когда вырожденный спонтанный параметрический процесс идёт в нелинейном волноводе, а в линейном волноводе распространяется мода в когерентном состоянии. Установлено, что фотоны моды из нелинейного и линейного волноводов становятся коррелированными и могут стать потенциальным кандидатом в качестве формирования квантовых фантомных изображений.

R. SINGH

Self-employed researcher, Moscow

THE POSSIBILITY OF FORMATION OF QUANTUM GHOST IMAGES USING A DIRECTIONAL COUPLER

Theoretically a possibility of formation of quantum ghost images using a directional coupler is considered in the case when linear and nonlinear waveguides interact and are arranged in parallel. Quantum correlation characteristics are studied when a spontaneous degenerate parametric process occurs in a nonlinear waveguide and a mode in a coherent state propagates in a linear waveguide. It has been established that mode photons from nonlinear and linear waveguides become correlated and can become a potential candidate for quantum ghost imaging.

Пусть в волноводах с квадратичной нелинейностью $\chi^{(2)}$ распространяются плоские, монохроматические, стационарные моды с накачкой \hat{a}_2 на частоте 2ω и две моды \hat{a}_1 рождаются на частотах ω , то есть, реализуется вырожденный параметрический процесс, а в линейном волноводе $\chi^{(1)}$ мода \hat{b}_1 на частоте ω в когерентном состоянии (рис. 1). Операторное уравнение для мод \hat{a}_2 опускается, так как она не истощается, а для мод \hat{a}_1 и \hat{b}_1 имеет вид [1]:

$$\frac{d\hat{b}_1}{dL} = -i\hat{a}_1, \quad \frac{d\hat{a}_1}{dL} = -i\left(2\gamma\hat{a}_1^+ A_2 + \hat{b}_1\right), \quad (1)$$

где $\gamma = g_2/g_1$ – соотношение нелинейного и линейного коэффициентов связей; $L = g_1 t$ – приведённая длина взаимодействия; A_2 – амплитуда неистощимой моды накачки. Систему операторных уравнений (1) можно решить аналитически с помощью, например, преобразования Лапласа. Вычислены квантовые корреляционные коэффициенты второго порядка между модами \hat{a}_1 и \hat{b}_1 в случае, когда они находились в вакуумном и когерентном состояниях.



Рис. 1. Схема формирования квантового фантомного изображения с помощью направленного ответвителя: в волноводе с квадратичной нелинейностью $\chi^{(2)}$ реализуется вырожденный спонтанный параметрический процесс и распространяются моды a_1 и a_2 на частотах ω и 2ω , а в линейном волноводе $\chi^{(1)}$ мода b_1 на частоте ω в когерентном состоянии; в прозрачном нелинейном кристалле с квадратичной нелинейностью $\chi^{(2)}$ пары фотонов накачки моды a_2 преобразуются в пары сигнального и холостого фотонов моды a_1 ; фотоны моды b_1 освещают объект O и фотоны моды a_1 матрицу фотодетекторов CCD в восстанавливающем канале; BD – интегрирующий детектор в объектном канале; C – коррелятор интенсивностей (схема совпадений)

Предложена схема формирования квантовых фантомных изображений с помощью направленного ответвителя. Анализ коэффициентов корреляции между модами \hat{a}_1 и \hat{b}_1 показал, что они становятся коррелированными ($g^{(2)} > 1$). Рассматриваемый направленный ответвитель потенциально может стать кандидатом в качестве формирования квантовых фантомных изображений [2].

Список литературы

1. Perina J., Perina J. Jr. Quantum Semiclass // Opt. 1995. V. 7. No. 4. P. 541,
2. Квантовое изображение /под ред. М.И. Колобова. М.: Физматлит, 2009.

С.Н. МОСЕНЦОВ
АО «ЛЛС», Санкт-Петербург

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕТЕКТОРОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ QRate И ID Quantique

Обзор результатов экспериментального исследования параметров детекторов одиночных фотонов российского производства компании QRate и швейцарского производства компании ID Quantique. Исследовались основные характеристики детекторов, такие как квантовая эффективность, частота темнового счёта и вероятность послеимпульсов.

S.N. MOSENTSOV
JSC «LLS», Saint-Petersburg

THE QRate AND ID Quantique SINGLE PHOTON DETECTORS EXPERIMENTAL ANALYSIS

The results' review of the manufactured in Russia by QRate and Swiss-made by ID Quantique single photon detectors parameters experimental study. The main characteristics of the detectors, such as quantum efficiency, the dark count rate and the afterpulsing probability were investigated.

Проведён обзор результатов экспериментального исследования параметров детекторов одиночных фотонов российского производства компании QRate и швейцарского производства компании ID Quantique. Проведены исследования основных характеристик детекторов, таких как квантовая эффективность, частота темнового счёта и вероятность послеимпульсов.

А.М. ЗОТОВ¹, П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}, Р.Т. КУБАНОВ¹,
Н.Н. ПАВЛОВ¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ

На основе численного моделирования выполнена оценка устойчивости структуры различных типов дислокаций волнового фронта излучения в процессе его распространения в свободном пространстве. Показано, что наибольшей устойчивостью обладает регулярная система краевых винтовых дислокаций.

A.M. ZOTOV¹, P.V. KOROLENKO^{1,2}, R.T. KUBANOV¹,
N.N. PAVLOV¹

¹Lomonosov Moscow State University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

PECULIARITIES OF LIGHT BEAMS PROPAGATION WITH SMALL-SCALE DISLOCATION STRUCTURE

On the basis of numerical simulation, the stability of various types wavefront dislocations of the during radiation propagation in free space is estimated. It is shown that a regular system of edge screw dislocations has the highest stability.

Исследованию свойств пучков с фазовыми дислокациями на волновой поверхности посвящены многочисленные работы. К одному из наиболее значимых результатов, достигнутых в этой области в последнее время, следует отметить реализацию пространственного сверхразрешения [1]. При анализе световых полей с системой мелкомасштабных дислокаций, обеспечивающих сверхразрешение, обойдённным оказался вопрос об устойчивости их структуры при распространении в свободном пространстве. Между тем известно, что, например, в устройствах флуоресцентной микроскопии световой пучок с системой дислокаций возбуждает в образце малоразмерные центры флуоресценции после того, как он прошёл определённое расстояние [2]. Целью данной статьи является разработка способа формирования мелкомасштабных дислокационных образований, обладающих наибольшей устойчивостью к

влиянию дифракционных эффектов и обеспечивающих сверхразрешение на максимально большом расстоянии.

В ходе проводимых исследований были рассмотрены системы дислокаций, построенные с помощью цилиндрических мод свободного пространства, классические спекловые структуры, а также винтовые дислокации, сформированные вращением линейных дислокаций. Для дополнительного уменьшения размеров дислокаций с помощью итерационной процедуры Герчберга–Сэкстона [3]. В результате преобразования такого поля с релеевской статистикой формируется дислокационная структура с узкими азимутально равномерными винтовыми дислокациями, обладающая нерелеевской дельтаобразной гистограммой интенсивности.

Выполненный анализ показал, что наибольшей устойчивостью к влиянию дифракции обладают дислокации третьего типа. На рис. 1 схематично показано формирование винтовой дислокации (ВД) в результате вращения линейной (краевой) дислокации (ЛД) [4].

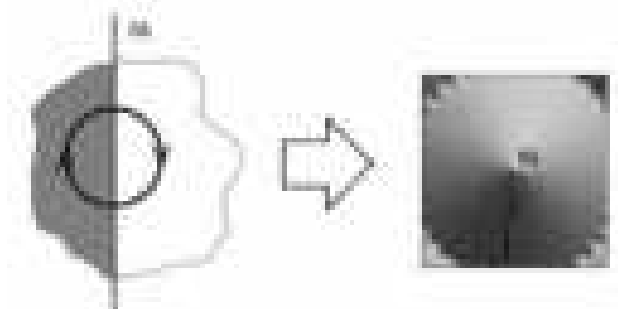


Рис. 1. Формирование ВД: слева – вращение ЛД, разделяющей области с противофазными световыми колебаниями, справа – представленное в градациях серого азимутальное распределение фазы ВД

С использованием построенных таким образом ВД была построена периодическая в двух поперечных направлениях структура. Такая структура в процессе дифракционного распространения не претерпевала значительных изменений на расстояниях, меньших, чем $z = 0.025T$, где T – расстояние самовоспроизведения.

Список литературы

1. Bender N., Sun M., et al. // *Optica*. 2021. V. 8. P. 122.
2. Gateau J., Chaigne T., et al. // *Opt. Lett.* 2013. V. 38. P. 5188.
3. Bender N. // *APL Photonics*. 2019. V. 4. P. 110806.
4. Электронная публикация https://scask.ru/l_book_h_flt.php?id=36.

Д.В. ПРОКОПОВА, Е.Г. АБРАМОЧКИН

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ЭЙРИ

Приведены результаты численного моделирования по распространению в зоне Френеля структурированных световых полей, построенных на основе трёх функций Эйри. Рассмотрен вопрос о разложении таких световых полей по базису мод Эрмита–Гаусса, выбора числа членов ряда и ширины гауссова пучка (w).

D.V. PROKOPOVA, E.G. ABRAMOSHKIN

Samara brunch of Lebedev Physical Institute of the RAS

STUDY OF PROPAGATION IN FREE SPACE OF LIGHT BEAMS BUILT ON THE BASIS OF AIRY FUNCTIONS

The results of numerical simulation of the propagation in the Fresnel zone of structured light fields constructed on the basis of three Airy functions are presented. The problem of the field expansion in terms of Hermite–Gaussian modes, considering the choice of the number of the series terms and selection of the Gaussian beam width is investigated.

Теория катастроф, обладающая мощным аналитическим аппаратом, нашла своё применение во многих областях науки [1]. Успешно эта теория применяется в оптике для описания естественных (природных) оптических явлений, таких как отражение света от нерегулярных поверхностей, распространение света в неоднородных средах и др. Характерная черта подобного рода процессов – появление каустик, демонстрирующих структурную устойчивость при возникновении малых возмущений окружающей среды. В оптике катастроф рассматриваются и исследуются определённые фазовые интегралы – интегралы дифракционных катастроф (ИДК).

В работе [2] предложено и исследовано двумерное поле, являющееся произведением трёх одномерных пучков Эйри, повернутых друг относительно друга на 120° и смещённых относительно центра координат на одинаковую величину, называемую параметром смещения (три-эйри пучки, A_{13}). Показано, что фурье-образ этого поля при любых значениях параметра смещения имеет кубическую фазу и радиально-симметричную

интенсивность с супергауссовым убыванием. Численно исследовано распространение таких пучков при некоторых значениях параметра смещения. Позднее вышли работы [3,4], посвящённые экспериментальной реализации три-эйри пучков. Параметр смещения при этом лежал на отрезке [1.1, 5.5]. Результаты экспериментов в [3, 4] согласуются с предсказанным в работе [2] поведением пучков при распространении и фокусировке.

Целью работы является численное исследование распространения в зоне Френеля структурированных световых полей, построенных на основе трёх функций Эйри. Рассмотрен вопрос о разложении таких световых полей по базису мод Эрмита–Гаусса, выбора числа членов ряда и ширины гауссова пучка (w).

Такие структурированные световые поля представляют интерес для задач распространения излучения на протяжённых трассах, создания плазменных каналов в атмосфере, расширения функциональных возможностей оптических пинцетов, передачи и кодирования информационных пакетов в турбулентной атмосфере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 23-22-00314).

Список литературы

1. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. В 2-х книгах. М.: Мир, 1984.
2. Abramochkin E.G., Razueva E.V. // Optics Letters. 2011. V. 36. P. 3732.
3. Liang Y., Ye Z., et. al. // Optics Express. 2013. V. 21. P. 1615.
4. Liang Y., Chen Y., Wan L. // Optics Communications. 2017. V. 405. P. 120.

А.А. ДЕРГАЧЕВ, С.А. ШЛЕНОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ФОРМИРОВАНИЕ И САМОФОКУСИРОВКА АКСИАЛЬНО-НЕСИММЕТРИЧНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ В ЗАШУМЛЁННОМ ПУЧКЕ

Численно исследуется статистика формирования горячих точек в фокальной плоскости собирающей линзы после прохождения гауссовым пучком спирального фазового транспаранта. Проводится сравнение трёх видов возмущений в исходном пучке: фазовый, амплитудный и амплитудно-фазовый мультипликативные гауссовы шумы с различным радиусом корреляции. Анализируется влияние эллиптичности пучка. Рассмотрена самофокусировка оптического вихря с двумя горячими точками.

A.A. DERGACHEV, S.A. SHLENOV

Lomonosov Moscow State University

FORMATION AND SELF-FOCUSING OF AN AXIALLY ASYMMETRIC OPTICAL VORTEX IN A NOISY BEAM

The statistics of the formation of hot spots in the focal plane of the collecting lens after the passage of a spiral phase transparency by a Gaussian beam is numerically investigated. Three types of disturbances in the initial beam are compared: phase, amplitude and amplitude-phase multiplicative Gaussian noise with different correlation radius. The influence of the beam ellipticity is analyzed. Self-focusing of an optical vortex with two hot spots is considered.

Для получения оптического вихря из гауссова пучка можно использовать спиральную фазовую пластинку (транспарант) [1, 2]. После прохождения гауссовым пучком такой пластинки в фокальной плоскости собирающей линзы формируется оптический вихрь с кольцевым профилем интенсивности и фазовой дислокацией на оси. При наличии возмущений в прошедшем фазовую пластинку пучке аксиальная симметрия нарушается, и тогда на кольцевом распределении интенсивности возникает несколько горячих точек, в которых при дальнейшем распространении в нелинейной среде возможно развитие множественной филаментации [3]. При этом динамика формирования и распространения филаментов существенно зависит от фазовых соотношений между ними [4 - 6]. То, как именно будут распределены

горячие точки на профиле аксиально-несимметричного вихря, зависит как от фазовых возмущений, вносимых транспарантом, так и от амплитудно-фазовых возмущений в гауссовом пучке.

Методом статистических испытаний нами показано, что при относительно небольшой дисперсии флуктуаций порядка нескольких процентов на кольцевом профиле оптического вихря с наибольшей вероятностью образуются две горячие точки. В случае амплитудно-фазового шума с радиусом корреляции 0.6 от диаметра гауссова пучка две трети реализаций оптического вихря содержат ровно две горячие точки в поперечном сечении пучка. Для фазового шума число таких реализаций достигает 80 % и для амплитудного - немногим более 50 %. При этом в более половине реализаций эти горячие точки располагаются диаметрально противоположно по отношению к области фазовой дислокации.

При распространении в нелинейной среде это препятствует обмену энергией между горячими точками и приводит к независимому формированию филаментов в них [7]. Критическая мощность самофокусировки в таком вихревом пучке больше, чем у пучка с тем же профилем интенсивности, но плоской фазой, хотя и примерно в два раза меньше оценки критической мощности аксиально-симметричного оптического вихря [8, 9]. При этом пространственный градиент фазы в вихревом пучке приводит к угловому смещению формирующихся филаментов относительно максимумов горячих точек, вызвавших их образование.

В эллиптическом пучке области повышенной интенсивности в поперечном сечении оптического вихря располагаются преимущественно вдоль более короткой оси.

Список литературы

1. Kotlyar V.V., Kovalev A.A., et al. // J. of Optical Technology. 2007. V. 74. P. 686.
2. Skidanov R.V. Ganshevskaya S.V. // Computer Optics. 2015. V. 39. P. 674.
3. Шленов С.А., Васильев Е.В. и др. // ЖЭТФ. 2021. Т. 159. С. 400.
4. Кандидов В.П., Косарева О.Г. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. С. 59.
5. Xi T.-T., Lu X., et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 025003.
6. Дергачев А.А., Кадан В.Н. и др. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42 (2). С. 125.
7. Шленов С.А., Компанец В.О. и др. // Квантовая электроника. 2022, Т. 52 (4). С. 322.
8. Kruglov V.I., Logvin Yu.A., et al. // J. of Modern Optics. 1992. V. 39. P. 2277.
9. Vuong L.T., Grow T.D., et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 133901.

Е.Г. ЦИПЛАКОВА, Н.В. ПЕТРОВ, Ж.-Б. ПЕРРО¹, А. ЧОПАРД^{1,2},
Ж.-П. ГИЙЕ¹, О.А. СМОЛЯНСКАЯ, П. МОНЕ¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Университет Бордо, Франция*

²*Компания Lytid, Париж, Франция*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФАЗЫ ТЕРАГЕРЦОВОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА МЕТОДОМ SBMIR С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНИКИ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДАННЫХ В ОБЛАСТЯХ ПЕРЕЭКСПОЗИЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Предложен метод восстановления фазы из интенсивности на основе алгоритма SBMIR, использующий технику экстраполяции данных для восстановления информации о распределении поля в областях переэкспозиции интенсивностей и формирования корректного приближения объектной волны при использовании детектора, ограниченного по верхнему порогу чувствительности. Метод позволяет преодолеть физическое ограничение многоплоскостного восстановления фазы, связанное с ограниченным динамическим диапазоном детектора.

E.G. TSIPLAKOVA, N.V. PETROV, J.-B. PERRAUD¹, A. CHOPARD^{1,2},
J.-P. GUILLET¹, O.A. SMOLYANSKAYA, P. MOUNAIX¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*University of Bordeaux, France*

²*Lytid SAS, Paris, France*

TERAHERTZ PHASE RETRIEVAL BY SBMIR WITH APPLICATION OF DATA EXTRAPOLATION TECHNIQUE IN THE OVEREXPOSED AREAS OF INTENSITY DISTRIBUTIONS

We propose phase retrieval method based on SBMIR algorithm and extrapolation technique to reconstruct information in overexposed areas of intensity distributions; as a result, a correct approximation of the object wavefield can be performed in case a detector with limited upper sensitivity threshold was used. Method allows to overcome the physical limitation of multiplane phase retrieval associated with restricted dynamic range of the detector.

Измерение распределения фазы электромагнитного поля имеет важную практическую значимость для современного мира, поскольку является одним из инструментов оптической диагностики макро и микрообъектов. Среди техник количественной фазовой визуализации широкое применение получили методы восстановления фазы, использующие итерационные

алгоритмы для получения пространственного распределения фазы и интенсивности. В настоящей работе исследуется применение одного из таких методов в ТГц-диапазоне частот – алгоритма SBMIR [1], использующего многоплоскостную регистрацию данных. На практике могут присутствовать различные физические ограничения SBMIR (связанные с неподходящим шагом регистрации, ограниченным полем зрения детектора или его динамическим диапазоном), для преодоления которых активно развиваются оптимизированные методы восстановления фазы [2, 3].

Целью работы является разработка алгоритма на основе SBMIR и техники экстраполяции, обладающего улучшенной сходимостью при использовании в качестве исходных данных распределений интенсивности, зарегистрированных при помощи детектора, ограниченного по верхнему порогу чувствительности. Идея метода заключается в экстраполяции распределений ТГц-поля в области переэкспозиции, реализуемой в ходе итерационного процесса SBMIR. Мы использовали распределения интенсивности, зарегистрированные в схеме на отражение из работы [4], полученные с одиночного синхронного усилителя (динамический диапазон – 30 дБ). В качестве источника выступал диод Ганна (0.287 ТГц, 14 мВт), в качестве детектора – диод с барьером Шоттки. В работе [5] для преодоления влияния переэкспозиции был внедрён метод HDR-регистрации, использующий два синхронных усилителя с комплементарной настройкой чувствительности (динамический диапазон – 50 дБ). На рис. 1 показаны распределения поля, восстановленные из данных HDR-съёмки, и полученные при помощи алгоритма экстраполяции. Таким образом, предложен альтернативный методу HDR-съёмки подход к восстановлению приближения фазы, требующий использования одного синхронного усилителя.

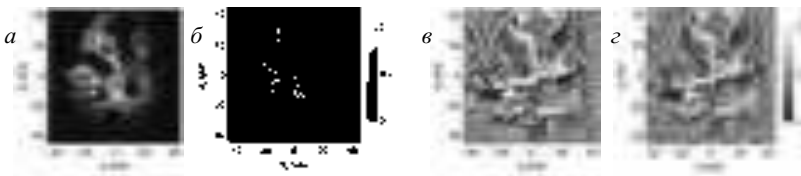


Рис. 1. Восстановленные амплитудные (*a, б*) и фазовые распределения (*в, г*): при помощи SBMIR из данных HDR-съёмки (*a, в*) и алгоритма экстраполяции (*б, г*)

Список литературы

1. Pedrini G., et al. // Optics Letters. 2005. V. 30 (8). P. 833-835.
2. Shevkunov I.A., et al. // Biomedical Optics Express. 2018. V. 9 (11). P. 5511-5523.
3. Zhengzhong H., et al. // Optics Communications. 2021. V. 481. P. 126526.
4. Petrov N.V., et al. // Optics Letters. 2020. V. 45 (15). P. 4168-4171.

О.М. ВОХНИК¹, П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}, В.И. МОХОВ¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ

Методами вейвлет-анализа исследована спекл-структура степени пространственной когерентности диспергированных лазерных полей с разной шириной спектра. Показано, что распределение крупномасштабных и мелкомасштабных областей когерентности в направлении распространения зависит от ширины спектра и по мере её увеличения доля крупномасштабных областей возрастает. Проведённые расчёты позволят оптимизировать параметры оптической схемы обращения волнового фронта немонахроматического излучения

O.M. VOKHNIK¹, P.V. KOROLENKO^{1,2}, V.I. MOKHOV¹

¹Lomonosov Moscow State University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

WAVELET ANALYSIS OF SPATIAL COHERENCE DEGREE OF DISPERSED LIGHT BEAMS

Wavelet analysis is used to study the speckle structure of the degree of spatial coherence of dispersed laser fields with different spectral widths. It is shown that the distribution of large-scale and small-scale coherence regions in the direction of propagation depends on the width of the spectrum, and as it increases, the proportion of large-scale regions increases. The performed calculations will make it possible to optimize the parameters of the optical scheme for phase conjugation of nonmonochromatic radiation.

Для повышения оптического качества излучения мощных лазерных систем широко используется обращение волнового фронта (ОВФ) [1] при когерентном четырёхволновом взаимодействии (ЧВВ) в нелинейных оптических средах. Поскольку эффективность ЧВВ быстро падает с увеличением ширины спектра излучения для её повышения предложен метод наклона слоёв когерентности, реализуемый внесением дисперсии во взаимодействующие пучки [2]. Внесение дисперсии влияет на пространственные распределения интенсивности и степени когерентности диспергированных пучков. В настоящей работе структура крупномасштабных и мелкомасштабных областей пространственной

когерентности диспергированных пучков с разной шириной спектра изучены методами вейвлет-анализа.

Двумерные распределения степени пространственной когерентности в плоскости распространения пучка $|\gamma(x, z)|$ рассчитаны для трёх значений ширины спектра $\Delta\omega$, равных 500, 1000 и 1500 см^{-1} . Они представляет собой случайные пространственно-неоднородные картины, состоящие из спеклов, вытянутых в продольном направлении z . Характерная длина и наклон спеклов относительно оси z изменяются по мере распространения, и эти изменения происходят тем быстрее, чем шире спектр.

Картины вейвлет-коэффициентов, определяющие особенности структурных изменений степени пространственной когерентности вдоль координаты z построенные для усреднённых одномерных зависимостей $|\gamma(x = \text{const}, z)|$ при разной ширине спектра, даны на рис. 1.

При узком спектре $\Delta\omega = 500 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1а) паттерны коэффициентов в области малых значений $a \sim 5$ видны как вблизи исходной плоскости, так и на большом удалении от неё. В то же время при широком спектре $\Delta\omega = 1500 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1б) области тех же малых значений a сосредоточены в основном вблизи исходной плоскости. Общим свойством показанных на рис. 1 картин вейвлет-коэффициентов является наличие в них двух характерных диапазонов изменения продольной координаты z . В первом диапазоне вблизи начальной плоскости значимую роль играют мелкокомасштабные паттерны, во втором – крупномасштабные.

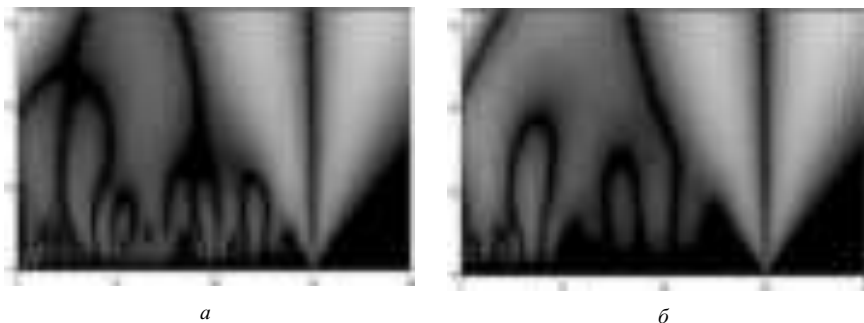


Рис. 1. Картины вейвлет-коэффициентов при $\Delta\omega = 500 \text{ см}^{-1}$ (а) и $\Delta\omega = 1500 \text{ см}^{-1}$ (б)

Список литературы

1. Akinyimika A., Wang Y., Cao C., et al. // Optics Communications. 2022. P. 128610.
2. Одинцов В.И., Соколова Е.Ю. // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. С. 778-780.

С.И. СПИРИДОНОВ, А.А. ЩЕРБАКОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

НОВАЯ ФОРМУЛИРОВКА ФУРЬЕ-МОДАЛЬНОГО МЕТОДА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАКТОРИЗАЦИИ ЛИ

Предложена новая формулировка фурье-модального метода, в которой отдельно учитываются разрывные компоненты поля, что позволяет исключить проявление эффекта Гиббса при расчётах ближнего поля. Запись граничных условий для разрывной части поля приводит к уравнению для задачи на собственные значения, в котором не требуется обращать матрицы. Результаты метода хорошо согласуются с результатами для классического подхода, основанного на правилах факторизации Ли, как для диэлектрических, так и для металлических решёток. Разработанный метод может найти своё применение в задачах оптического детектирования и нелинейной оптики.

S.I. SPIRIDONOV, A.A. SHCHERBAKOV

ITMO University, Saint-Petersburg

THE NEW FORMULATION OF THE FOURIER MODAL METHOD WITHOUT LI FACTORIZATION

We propose a new formulation of the Fourier-modal method based on a separate consideration of the discontinuous part of the field, which allows us to overcome the influence of the Gibbs effect. An explicit consideration of the boundary conditions for the discontinuous part of the field leads to an equation for the eigenvalue problem, which can be written in an inversion-free form. The results of the method are in good agreement with the results for the classical approach based on the Li factorization rules for both dielectric and metal gratings. Moreover, the developed method makes it possible to calculate the near field much more accurately and can be used in problems of sensing and nonlinear optics.

Фурье-модальный метод (ФММ) – это широко используемый инструмент для расчёта взаимодействия электромагнитного излучения с периодическими структурами. Он основан на разложении Фурье по плоским волнам всех периодических функций и завоевал популярность благодаря эффективности для широкого класса задач. Этот метод хорошо подходит для анализа периодических металлических и диэлектрических структур, моделирования солнечных элементов, задач нелинейной оптики.

Весь метод можно разбить на три этапа [1]. На первом шаге рассматривается бесконечная периодическая структура. Записываются уравнения Максвелла, все поля раскладываются в соответствии с теоремой Блоха, после чего задача рассматривается в фурье-пространстве с учётом так называемых правил факторизации Ли для разрывных функций [1]. Это приводит к задаче на собственные значения для фурье-компонент полей. На втором шаге рассматривается граница структуры с внешней средой и записывается матрица переноса или T-матрица. На последнем шаге добавляется вторая граница и записывается матрица рассеяния или S-матрица.

Однако у разложения в ряд Фурье по плоским волнам есть существенный недостаток – эффект Гиббса, то есть осцилляции вблизи точек разрыва, возникающие при разложении разрывных функций. Из-за этого невозможно точно рассчитывать ближнее поле.

В этой работе предложена новая формулировка ФММ, которая позволяет значительно уменьшить влияние эффекта Гиббса. Поле внутри структуры раскладывается на непрерывную и разрывную компоненты. Для разрывной части граничные условия записываются отдельно, непрерывная компонента раскладывается по плоским волнам согласно классическому ФММ. Учёт граничных условий приводит к дополнительным слагаемым в матричных уравнениях. Это приводит к новой формулировке задачи на собственные значения, в которой, в отличие от классического подхода, не требуется обращать матрицы. Дальнейшие шаги аналогичны обычному ФММ, за исключением того, что во всех уравнениях для ближнего поля необходимо учитывать дополнительное слагаемое от учёта разрывной части поля.

Результаты численного исследования для простого одномерного случая показывают, что новая формулировка сохранила все преимущества стандартного подхода [1, 2], но при этом не требует обращения матриц в задаче на собственные значения и позволяет значительно точнее рассчитывать ближнее поле внутри структуры, преодолев эффект Гиббса. Подход планируется расширить на случай двумерных задач. Новая формулировка может найти применение в задачах сенсинга и нелинейной оптики.

Список литературы:

1. Li L. // JOSA A. 1996. V. 13. No. 9. P. 1870-1876.
2. Weismann M., Gallagher D.F.G., Panoiu N.C. // Journal of Optics. 2015. V. 17. No. 12. P. 125612.

М.Г. ИНКИН, А.В. СКРИПАЛЬ, С.Ю. ДОБДИН

*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ПО СПЕКТРУ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА

Предложен метод измерения абсолютного расстояния по спектру интерференционного сигнала частотно-модулированного лазерного диода. Представлен результат апробации метода на экспериментальных измерениях.

M.G. INKIN, A.V. SKRIPAL, S.Yu. DOBDIN

Saratov State University (National Research University)

METHOD FOR MEASURING DISTANCE ACCORDING TO THE SPECTRUM OF FREQUENCY MODULATED LASER AUTODYNE

A method is proposed for measuring the absolute distance from the spectrum of the interference signal of a frequency-modulated laser diode. The result of approbation of the method on experimental measurements is presented.

Определение абсолютного расстояния при помощи частотной модуляции длины волны лазерного излучения в последнее время получило значительное развитие [1]. В ранних работах погрешность измерения имела значительную величину. Однако, с совершенствованием технологий изготовления лазерных диодов, появилась возможность осуществлять модуляцию тока питания лазера с большей амплитудой [2, 3]. При этом точность измерения возрастает пропорционально увеличению амплитуды девиации длины волны лазерного автодина [4, 5].

В данной работе предложен метод измерения абсолютного расстояния с помощью частотной модуляции тока питания лазерного автодина, основанный на аппроксимации спада спектра сигнала.

Модель интерференционного сигнала, показывает, что измеряемое расстояние можно определить через длину волны лазерного излучения и её девиацию, а также через частоту ν_n , соответствующую максимальной частоте изменения интерференционного сигнала.

Определение частоты ν_n осуществляется при помощи построения огибающей спада спектра автодинного сигнала. Исходя из свойств

преобразования Фурье для ограниченных порогом функций, частота ν_n будет определяться как точка перегиба огибающей спада спектра сигнала.

Огибающая спада спектра автодинного сигнала получена при помощи аппроксимации гармоник спектра, частоты которых кратны частоте девиации тока питания лазерного диода. Аппроксимация осуществлялась линейным полиномом пятой степени. Точка перегиба определялась как минимум первой производной огибающей спада спектра сигнала.

Измерения проводились на установке, в состав которой входил полупроводниковый лазерный модуль HLDP 650a на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой, работающий в автодинном режиме. Регистрируемый сигнал и его спектр представлены на рис. 1.



Рис. 1. Измеренный автодинный сигнал (а) и его спектр (б)

Рассчитанное по спектру автодинного сигнала лазерного диода (рис. 1б) значение расстояния составило 51,5 мм. В результате серии измерений абсолютного расстояния получен разброс, значение которого составило 75 мкм.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (проект № 171ГССС15-Л/78935).

Список литературы

1. Donati S. // Proceedings of SPIE. 2016. V. 10150. P. 1015011.
2. Скрипаль А.В., Добдин С.Ю., Джафаров А.В., Садчикова К.А., Феклистов В.Б. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2020. Т. 20 (2). С. 84.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю., Джафаров А.В., Соколенко И.С. // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43 (5). С. 797.
4. Носков В.Я., Смольский С.М. // Радиотехника. 2013. Т. 8. С. 91.
5. Wang H., Ruan Y., Yu Y., Guo Q., Xi J., Tong J. // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 123253.

А.О. ГЕОРГИЕВА, А.С. ЕЗЕРСКИЙ, А.В. ЧЕРНЫХ, Н.В. ПЕТРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЧИСЛЕННОЕ СМЕЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЕВОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА В СХЕМЕ НЕЗАВИСИМОЙ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

Приведены результаты экспериментов по численному смещению плоскости формирования целевого волнового фронта в схеме независимой амплитудно-фазовой модуляции посредством цифрового микрзеркального устройства. Регистрация амплитудных и фазовых распределений производилась с помощью голографической системы с применением эффекта геометрической фазы. Определены изменения показателей качества волнового фронта при численном смещении плоскости формирования целевого волнового фронта на 1 см.

A.O. GEORGIEVA, A.S. ESERSKII, A.V. CHERNYKH,
N.V. PETROV
ITMO University, Saint-Petersburg

NUMERICAL DISPLACEMENT OF TARGET WAVEFRONT FORMATION PLANE IN INDEPENDENT AMPLITUDE-PHASE MODULATION SETUP

The paper presents the results of experiments on the numerical displacement of the target wavefront formation plane in independent amplitude-phase modulation scheme with digital micromirror device. Amplitude and phase distributions were recorded using a holographic system using the geometric phase effect. The changes in the quality indicators of the wavefront at a numerical displacement of the target wavefront formation plane by 1 cm have been determined.

Технологии независимой амплитудно-фазовой модуляции волнового фронта в выходной плоскости оптических систем с пространственной фильтрацией эффективны при решении широкого круга задач. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования численного смещения плоскости формирования целевого волнового фронта. Это подразумевает генерацию волнового фронта с помощью анализа результирующего поля в выходной плоскости 4f-системы и решения дифракционных уравнений, описывающих распространение волнового фронта за пределы плоскости выходной плоскости 4f-системы

(ТР) [1]. Экспериментальная установка представляла собой оптическую систему с пространственной фильтрацией первого дифракционного порядка в общей плоскости 4f-системы с использованием цифрового микрозеркального устройства (DMD) Texas Instrument Light Crafter DLP6500FYE (рис. 1). Для генерации бинарных паттернов использовался метод компьютерной голографии Ли. Для регистрации фазовых распределений была использована голографическая система общего пути с применением линзы с эффектом геометрической фазы (GPL) и поляризационной камеры [2].

Численно и экспериментально показано смещение плоскости формирования волнового фронта целевого волнового фронта на 1 см при использовании независимой амплитудно-фазовой модуляции цифровым микрозеркальным устройством [3]. Показано, что увеличение уровней квантования сопровождается небольшим ухудшением пространственного разрешения фазового распределения (рис. 2). Результаты данного исследования могут быть востребованы в приложениях, где требуется быстрое численное смещение плоскости формирования целевого волнового фронта в системах визуализации с DMD, например, фокусировка через рассеивающие среды или коррекция аберраций.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента (грант № MD-6101.2021.1.2).

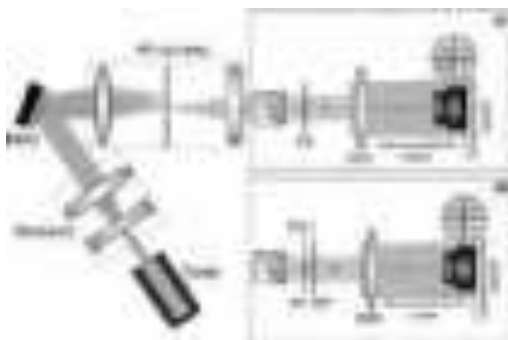


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

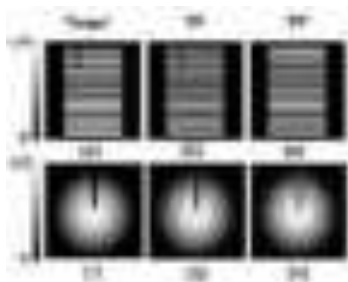


Рис. 2. Фазовые распределения: целевые (*a*, *z*), в ТР (*б*, *д*), в ТР' (*в*, *е*)

Список литературы

1. Zhu Z., Shi Z. // Applied Physics Letters. 2016. V. 109. P. 91104.
2. Chernykh A.V., et al. // Proceedings SPIE. 2021. V. 11898. P. 113-120.
3. Georgieva A.O., et al. // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. P. 258-265.

О.В. МИНИНА^{1,2}, Ю.Э. ГЕЙНЦ¹, А.А. ЗЕМЛЯНОВ¹

¹*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ МОЩНЫХ ФАЗОМОДУЛИРОВАННЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ВОЗДУХЕ

На основе численного решения усреднённого по времени нелинейного уравнения Шредингера рассмотрено распространение фазомодулированных мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе. Моделирование проводилось для фазовых масок, состоящих из 9, 6 и 4 элементов, для различных значений скачка фазы волны между соседними элементами и параметров излучения. Показано, что филаментация мощных фемтосекундных лазерных импульсов для масок с меньшим числом элементов происходит на большем расстоянии от источника излучения. Для формируемых постфиламентационных световых каналов характерны более высокие значения интенсивности.

O. V. MININA^{1,2}, Yu. E. GEINTS¹, A. A. ZEMLYANOV¹

¹*V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the SB RAS, Tomsk*

²*National Research Tomsk State University*

CONTROL OVER THE PROPAGATION OF HIGH-POWER PHASE-MODULATED FEMTOSECOND LASER PULSES IN AIR

The propagation of high-power phase-modulated femtosecond laser pulses in air is considered based on the numerical solution of the time-averaged nonlinear Schrödinger equation. The simulation is carried out for phase masks consisting of 9, 6 and 4 elements, for different values of the phase jump between adjacent mask elements and parameters of laser radiation. It is shown that the filamentation of high-power femtosecond laser pulses for masks with a smaller number of elements occurs at a greater distance from the radiation source. The formed postfilamentation light channels are characterized by higher intensity values.

Управление характеристиками области множественной филаментации и постфиламентационных каналов (ПФК) на протяжённых атмосферных трассах является одной из актуальных задач фемтосекундной атмосферной оптики. В рамках её решения в данной работе на основе численного решения усреднённого по времени нелинейного уравнения Шредингера [1] рассмотрено распространение фемтосекундного лазерного излучения в условиях дополнительной модуляции фазы за счёт

использования фазовых масок с размерностями 3×3 , 3×2 и 2×2 . Для удобства маски пронумерованы латинскими цифрами I – III в соответствии с порядком следования на рис. 1а. Подробное описание принципов задания масок при численном моделировании, а также основные соотношения представлены в [2].

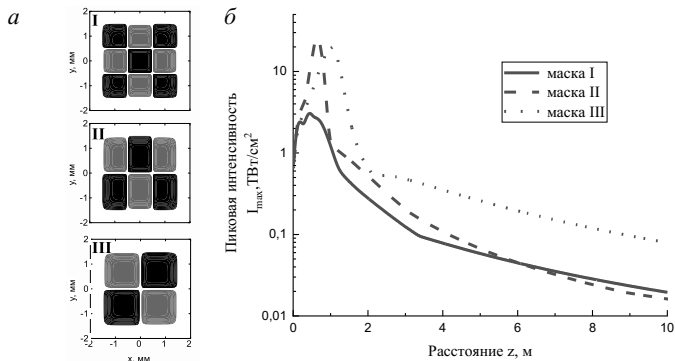


Рис. 1. Фазовые маски, используемые в численном моделировании с разностью фаз между соседними элементами $\Delta\varphi = -\pi$ (а), зависимость максимальной интенсивности вдоль трассы при распространении лазерного импульса относительной пиковой мощностью $\eta = 5$ для пучка радиусом $R_0 = 1$ мм; длина волны $\lambda_0 = 800$ нм, длительность импульса $t_p = 50$ фс (б)

Разделение унимодального лазерного пучка на отдельные сегменты за счёт использования фазовой маски позволяет уменьшить влияние мелкомасштабной самофокусировки, а также контролировать параметры области филаментации и ПФК. Это подтверждает рис.1б, построенный для масок с различным числом элементов. Так с уменьшением количества элементов маски координата начала филаментации сдвигается от начала трассы, что вызвано увеличением размеров отдельных субпучков, формируемых после прохождения масок. Для масок с меньшим количеством элементов также формируются более высокоинтенсивные ПФК (пунктирная кривая на рис.1б) со значениями > 0.1 ТВт/см².

Исследования симметричных фазовых масок выполнены в рамках гранта РНФ (проект № 21-12-00109), несимметричных – государственного задания ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Berge L., Skupin S., Lederer F., et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 92. P. 225002.
2. Geints Yu.E., Minina O.V., Zemlyanov A.A. // JOSAB. 2022. V. 39. Iss. 6. P. 1549.

В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ, Д.А. ТРЕТЬЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ЦИФРОВАЯ ПРЕДОБРАБОТКА В ЛИНЕАРИЗАЦИИ АНАЛОГОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СВЧ-ТРАКТОВ

Обсуждаются возможности методов цифровой линейризации с предобработкой радиочастотного сигнала перед подачей на оптический тракт, а также возможные характеристики задач, в которых они могут быть использованы.

V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV, D.A. TRETYAKOV
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIGITAL PRE-DISTORTION TECHNIQUES FOR LINEARIZATION MICROWAVE PHOTONIC LINKS

The possibilities of digital linearization methods with pre-processing of the radio frequency signal of the optical link are discussed, as well as the possible characteristics of the systems in which they can be used.

Сегодня трудно оценить весь диапазон применения оптических СВЧ-трактов. Но в целом задачи, для которых используются оптические СВЧ-тракты с несущими на длинах волн 1,3 или 1,5 мкм, можно разбить на радиолокационные, ВОЛС и процессорные. В свою очередь основные группы методов по оптимизации линейного динамического диапазона (линеаризации) можно разбить, как показано на рис. 1 [1].

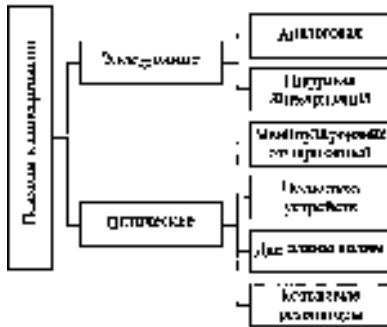


Рис. 1. Основные группы подходов к линеаризации аналоговых оптических СВЧ-трактов

В табл. 1 [2] представлено сравнение методов линейризации.

Таблица 1. Сравнение методов линейризации

Параметры системы	Методы линейризации		
	Оптические	Аналоговые	Цифровые
Рабочая полоса	Сверхширокая	Широкая	Узкая
Нелинейности 2-го и 3-го порядка	Подавляет оба порядка	Подавляет только 3-ий порядок	Может подавлять оба порядка («сложно»)
Потери	Сильные	Варьируемые	Низкие
Сложность тракта	Средняя	Низкая	Высокая
Цена	Средняя	Низкая	Высокая
Производительность (на текущий момент)	Хорошая	Нормальная	Лучшая

Из табл. 1 видно, что на текущий момент в задачах линейризации ВОЛС преимущество отдается цифровым методом. Однако показано, что цифровые методы можно использовать и для некоторых задач с мгновенной полосой в десятки ГГц [3].

Список литературы

1. Небавский В.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Методы линейризации аналоговых оптических трактов // Успехи современной радиоэлектроники. 2021. Т. 75. № 12. С. 42-62.
2. Singh S., Arya S.K., Singla S. A study & review of various optical linearization techniques for next generation RoF networks // Proc. IEEE Int. Conf. Signal Process. Control. 2019. V. 2019. P. 125-133.
3. Napoli A., Mezghanni M.M., Calabrò S., Palmer R., Saathoff G., Spinnler B. Digital predistortion techniques for finite extinction ratio IQ Mach-Zehnder modulators // Journal of Lightwave Technology. 2017. V. 35. No. 19. P. 4289-4296.

Ф.М. ГОНЧАРОВ, Б.Е. ПЕРВУШИН, Б.А. НАСЕДКИН

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ПОСЫЛКИ ОПОРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА НА НЕПРЕРЫВНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Исследовано влияние соотношения сигнальных и опорных импульсов на скорость генерации секретного ключа в системе квантового распределения ключа на непрерывных переменных. Приведено моделирование влияния соотношения сигнальных и опорных импульсов на точность работы алгоритма фазовой компенсации. Произведена оценка оптимальной частоты опорных импульсов.

F.M. GONCHAROV, B.E. PERVUSHIN, B.A. NASEDKIN

ITMO University, Saint-Petersburg

OPTIMIZATION OF REFERENCE PULSES FREQUENCY FOR CONTINUOUS-VARIABLE QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The effect of the ratio of signal and reference pulses on the secure key rate in a continuous-variable quantum key distribution system is studied. The simulation of the influence of the ratio of signal and reference pulses on the accuracy of the phase compensation algorithm is presented. The optimal frequency of reference pulses is evaluated.

Квантовое распределение ключа на непрерывных переменных (КРК НП) является перспективным направлением развития квантовых коммуникаций [1, 2]. Для протоколов КРК НП применяется когерентное детектирование [3], которое обуславливает необходимость учёта и компенсации фазовых шумов [4 - 6]. Алгоритмы фазовой компенсации используют опорные импульсы для определения дрейфа фазы и корректировки сигнальных квадратур. Соотношение числа сигнальных и опорных импульсов влияет на точность проведения фазовой компенсации. С другой стороны, оно также влияет на скорость генерации секретного ключа (СГСК).

Целью работы является определение оптимальной частоты опорных импульсов путём исследования влияния соотношения сигнальных и опорных импульсов на СГСК и точность фазовой компенсации. Соотношение сигнальных и опорных импульсов зависит от частоты

опорных импульсов. На рис. 1 представлен результат увеличения СГСК при увеличении числа сигналов на один опорный импульс относительно СГСК при соотношении 1 к 1 сигнальных и опорных импульсов. На рис. 2 представлено моделирование точности работы алгоритма фазовой компенсации для различных частот опорных импульсов. Характерные частоты фазовых шумов для экспериментальной системы находятся в диапазоне от 1 до 80 Гц. Из рис. 2 один видно, что при частоте опорных импульсов порядка 1 кГц и выше ошибка фазовой компенсации становится достаточно малой (порядка 10^{-5} и меньше).

Принимая во внимание зависимости, представленные на рис. 1 и 2 можно сделать вывод, что оптимальная частота опорных импульсов f_{ref} может быть оценена как

$$10f_{phase} < f_{ref} < 10^2 f_{rep},$$

где f_{phase} – максимальная характерная частота фазовых шумов, f_{rep} – частота посылки импульсов.

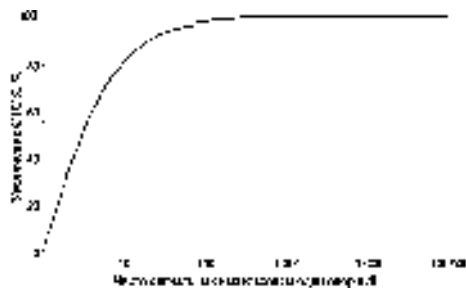


Рис. 1. Увеличение СГСК при увеличении числа сигналов на один опорный импульс относительно СГСК при соотношении 1:1

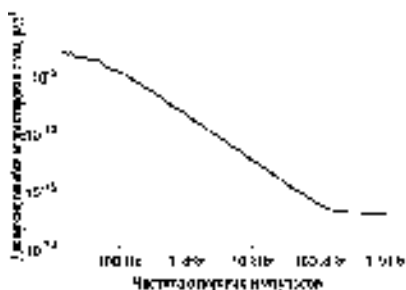


Рис. 2. Зависимость дисперсии ошибки корректировки фазы от частоты опорных импульсов

Список литературы

1. Goncharov R.K., et al. // Optics. 2022. V. 3. No. 4. P. 338-351.
2. Laudenbach F., et al. // Advanced Quantum Technologies. 2018 V. 1. No. 1. P. 1800011.
3. Hirano T., et al. // Physical review A. 2003. V. 68. No. 4. P. 042331.
4. Soh D.B.S., et al. // Physical Review X. 2015. V. 5. No. 4. P. 041010.
5. Marie A., Alleaume R. // Physical Review A. 2017. V. 95. No. 1. P. 012316.
6. Shao Y., et al. // Physical Review A. 2021. V. 104. No. 3. P. 032608.

И.О. БРАГИН, В.В. ЮШИЦЫНА
Южный федеральный университет, Таганрог

ЗАЩИЩЁННЫЙ КАНАЛ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

В работе описана телекоммуникационная система территориально распределённого предприятия, в основе которой применяется волоконно-оптический канал связи, а защищённость передаваемых данных основана на принципах квантовой криптографии. Приведены результаты компьютерного моделирования квантового канала связи с учётом влияния изменяющихся внешних факторов. Описан принцип действия распределённой телекоммуникационной системы и показано, как влияет процесс синхронизации системы квантового распределения ключей на скорость инициализации приемо-передающего комплекса. Исследована зависимость скорости формирования ключевой последовательности от длины квантового канала связи на примере автокомпенсационной системы квантового распределения ключей, и выполнен расчёт затухания сигнала в оптическом канале связи, который используется для генерации квантовых ключей.

I.O. BRAGIN, V.V. YUSHITSYNA
Southern Federal University, Taganrog

SECURE COMMUNICATION CHANNEL BASED ON QUANTUM KEY DISTRIBUTION

The paper describes a telecommunications system of a geographically distributed enterprise, based on a fiber-optic communication channel, and the security of transmitted data is based on the principles of quantum cryptography. The results of computer simulation of a quantum communication channel are presented, taking into account the influence of changing external factors. The principle of operation of a distributed telecommunication system is described and it is shown how the synchronization process of the quantum key distribution system affects the initialization rate of the receiving-transmitting complex. The dependence of the rate of key sequence formation on the length of a quantum communication channel is investigated using the example of an autocompensation system of quantum key distribution and the calculation of signal attenuation in an optical communication channel used for generating quantum keys is performed.

В единой системе оптической связи существует множество параметров и технологий, благодаря которым достигается оперативная, бесперебойная, своевременная и безопасная передача информации [1].

Также существуют различные типы информации, которые делятся на классы в зависимости от ценности представленных сведений. Информационный спектр в рассматриваемом предприятии может включать в себя как материалы о самом предприятии, так и конфиденциальные данные клиентов. Они, в свою очередь, имеют высокую значимость для организации и нуждаются в гарантированной безопасности как при её хранении, так и передаче между территориально распределёнными отделениями.

Модель безопасности рассматриваемого предприятия включает в себя множество сред передачи информации и имеет обширный стек используемых технологий для организации защищённого обмена данными. Чтобы организовать защищённую передачу информации с одного филиала предприятия в другой, было принято решение использовать систему квантового распределения ключей (КРК). Система КРК состоит из двух станций [2]. Приемо-передающая станция традиционно именуется «Боб», станция кодирующая – «Алиса». Они соединены волоконно-оптической линией связи (квантовым каналом), в качестве которого применяется стандартное одномодовое оптическое волокно. Конфигурация станций КРК универсальна с точки зрения форм-фактора для применения в телекоммуникационных системах. Оптические сигналы передаются от приемо-передающей станции к кодирующей и обратно по одному оптическому пути. Последнее позволяет использовать одно волокно в оптическом кабеле и снижает риск несанкционированного доступа к квантовому каналу [3].

Экспериментальные исследования описывают два объекта, расстояние между которыми порядка 40 км. Топология реализации – «Точка-точка». Натурные испытания проводились на макете, который имитировал реальные условия эксплуатации квантового канала связи с учётом воздействия внешних дестабилизирующих факторов окружающей среды.

Были рассчитаны вносимые затухания и допустимые потери, полученные рефлектометрическим методом. Максимальное значение потерь составило 8,08 Дб на всей длине квантового канала. Было выполнено моделирование динамических потерь системы в пакете «OptiSystem» и получены их прогнозируемые предельные значения.

Работа выполнена при поддержке ИКТИБ ЮФУ и Pjjonkins inc.

Список литературы

1. Pjjonkin A., Konstantin R. // ACM International Conference Proceeding Series. P. 87-90.
2. Pjjonkin A., Singh P.K. // 5th International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing. P. 795-799.
3. Pjjonkin A., Petrov D., Sabantina L., Dakhkilgova K. // Entropy. 2021. V. 23. P. 509.

Е.П. ПАНТЕЛЕЕВА, О.С. КАБАНОВА, Е.А. МЕЛЬНИКОВА
Белорусский государственный университет, Минск

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК

Разработан метод создания электрически управляемых дифракционных поляризационных элементов, основанный на технологии поляризационно-голографической записи поверхностной анизотропии в слое азокрасителя AtA-2. Создан электрически управляемый дифракционный поляризационный элемент, формирующий оптические вихри.

Ye.P. PANTSIALEYEVA, O.S. KABANOVA, E.A. MELNIKOVA
Belarusian State University, Minsk

POLARIZATION-HOLOGRAPHIC RECORDING OF LIQUID CRYSTAL DIFFRACTION GRATINGS

A method for creating electrically controlled diffraction polarization elements based on the technology of polarization-holographic recording of surface anisotropy in the AtA-2 azo dye layer has been developed. An electrically controlled diffraction polarizing element forming optical vortices has been created.

Одним из способов формирования сингулярных световых пучков с помощью дифракционных элементов является использование голографической записи [1].

В работе методом поляризационной голографической записи изготовлены жидкокристаллические дифракционные элементы на основе фотоориентации азокрасителя AtA-2 [2]. Поляризационно-голографический метод формирования анизотропии на поверхности тонких плёнок азокрасителя, нанесённого на подложки склеенной ЖК-ячейки, реализовывался по схеме Лейта – Упатниекса с ортогональными линейными и круговыми поляризациями в сигнальном и опорном пучке ($\lambda = 488$ нм). На основе разработанной технологии создан электрически управляемый жидкокристаллический дифракционный поляризационный элемент, формирующий оптические вихри. Исследованы экспериментальные зависимости (рис. 1) дифракционной эффективности от управляющего напряжения на ЖК-элементе и проведён

анализ устойчивости сингулярных фазовых пучков относительно управляющего напряжения на ЖК-элементе.

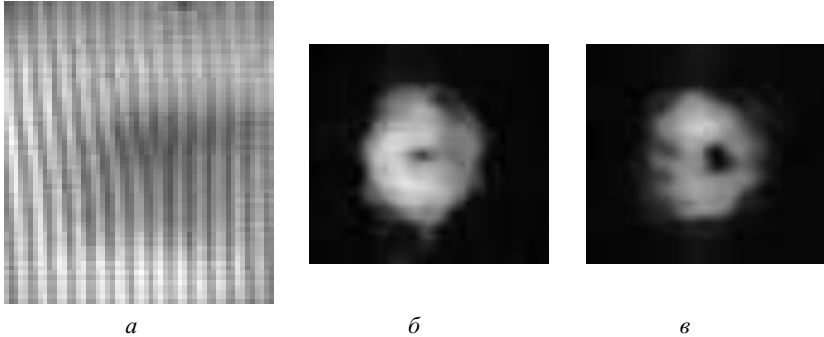


Рис. 1. Микрофотографии картины интерференции плоской волны и оптического вихря с топологическим зарядом $l = |1|$ (а), распределения интенсивности восстановленного гелий-неоновым лазером в -1 порядок оптического вихря (б), восстановленного в +1 порядок оптического вихря (в)

Проведённые в работе экспериментальные исследования демонстрируют перспективность предложенного метода для создания дифракционных ЖК-элементов.

Список литературы

1. Melnikova E.A., Kurapov J.D., Romanov O.G., Tolstik A.L. // Proc. of 11-th International conference «HoloExpo-2014». 2014. P. 99-104.
2. Mikulich V.S., Murauski An.A., Muravsky A.I.A., Agabekov V.E. // Appl. Spectr. 2016. V. 83 (1). P. 115-120.

В.М. КОТОВ¹, С.В. АВЕРИН¹, А.А. ЗЕНКИНА^{1,2},
А.С. БЕЛОУСОВА^{1,3}

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва*

³*Мытищинский филиал Московского государственного технического
университета им. Н.Э. Баумана*

ДВУХКАНАЛЬНАЯ ФУРЬЕ-ОБРАБОТКА ДВУМЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРАТНОЙ БРЭГГОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ

Рассмотрено двумерное выделение контура изображения по двум каналам в процессе его фурье-обработки с помощью акустооптического (АО) фильтра, оперирующего в режиме многократной брэгговской дифракции. Получены передаточные функции двух- и трёхкратной дифракции, найдены варианты, обеспечивающие формирование контура в двух дифракционных порядках. Основные результаты подтверждены экспериментально.

V.M. KOTOV¹, S.V. AVERIN¹, A.A. SENKINA^{1,2},
A.S. BELOUSOVA^{1,3}

¹*Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS*

²*MIREA – Russian Technological University*

³*Mytishchy Branch of Bauman Moscow State Technical University*

TWO-CHANNEL FOURIER PROCESSING OF TWO-DIMENSIONAL IMAGES USING MULTI PHONON BRAGG DIFFRACTION

Two-dimensional image edge enhancement in two channels during Fourier processing with the using of an acousto-optic (AO) filter operating in the regime of multiple Bragg diffraction is considered. The transfer functions of two- and three-phonon diffraction are obtained, variants are found that provide the formation of a contour in two diffraction orders. The main results are confirmed experimentally.

Многократная брэгговская дифракция открывает широкие возможности для двумерной обработки изображений (например, [1, 2]). В частности, она позволяет формировать двумерный контур сразу по двум каналам, являющимися, по сути, дифракционными порядками. Отметим, что двухканальная система позволяет увеличить надежность измерений,

уменьшить шумы, а так же открывает возможность решать более широкий круг задач, например – сконцентрироваться на одних участках изображения по одному каналу, на других – по другому.

В процессе исследований получены передаточные функции дифракционных порядков в процессе двух- и трёхкратного акустооптического (АО) взаимодействия. Показано, что многообразие распределений функций позволяет получить контур изображения одновременно в двух порядках. Некоторые из полученных результатов подтверждены экспериментально. Например, на рис. 1 приведены фотографии изображения в виде круга до фурье-обработки (рис. 1а), и после оптической фурье-обработки (рис. 1б) с использованием АО-фильтра пространственных частот, работающего в режиме двукратной брэгговской дифракции. Нулевой, 1-й и 2-й дифракционные порядки располагаются справа налево. Из рис. 1б видно, что в нулевом и втором дифракционных порядках сформирован ярко выраженный контур изображения с рис. 1а. Наблюдаемые контуры не совпадают между собой, а дополняют друг друга, что подтверждает достоинство измерений по двум каналам.

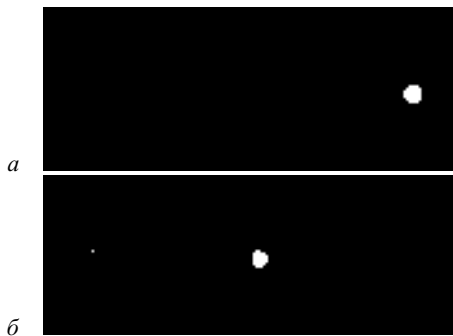


Рис. 1. Экспериментально наблюдаемые изображения до фурье-обработки (а) и после Фурье-обработки (б)

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-21-00059).

Список литературы

1. Kotov V.M., Averin S.V., Kotov E.V., Shkerdin G.N. Acousto-optic filters based on the superposition of diffraction fields [invited] // *Applied Optics*. 2018. V. 57. No. 10. P. C83-C92.
2. Котов В.М., Аверин С.В. Выделение двумерного контура изображения с использованием двух порядков брэгговской дифракции // *Квантовая электроника*. 2020. Т. 50. № 3. С. 305-308.

А.Л. ФИЛАТОВ¹, В.М. ЛУКАНИНА^{1,2}

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН

²Щелковский колледж, Московская обл.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ В ГЕОСТАЦИОНАРНОМ ДЕТЕКТОРЕ МОЛНИЙ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Исследуются проблемы использования на геостационарной орбите узкополосных интерференционных и акустооптических фильтров видимого диапазона для мониторинга всей поверхности Земли. Для создания максимально широкоугольных акустооптических приборов предложено компенсировать дефлекцию, которая сопутствует фильтрации изображения, не только аппаратным, но и программным образом.

A.L. FILATOV¹, V.M. LUKANINA^{1,2}

¹Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

²Shchelkovo College, Moscow region

PROSPECTS FOR ACOUSTOOPTIC FILTERS APPLICATIONS IN A GEOSTATIONARY LIGHTNING DETECTOR

The problems of using narrow-band interference and acoustooptic filters in the visible range in geostationary orbit for monitoring the entire surface of the Earth are investigated. To create the most wide-angle acoustooptic devices, it is proposed to compensate for the deflection that accompanies image filtering, not only in hardware, but also in software.

Роскосмос планирует вывести на геостационарную орбиту детектор молний (ГДМ). В 2017 году NASA уже запустило систему GLM (Geostationary Lightning Mapper) на спутнике GOES-16. В статьях [1, 2] проанализированы проблемы, возникающие при использовании установленного на GLM узкополосного (≈ 2 нм) интерференционного фильтра (ИФ), и предложено применить хорошо зарекомендовавшие себя акустооптические фильтры (АОФ) космического базирования [3 - 7]. Узкополосные АОФ иначе, чем ИФ, выполняют функцию фильтрации расходящегося под углом 17° видимого света. В ИФ при наклонном падении излучения под углом 4° к нормали полоса 1.7 нм смещается на 0.7 нм. Положение полосы пропускания АОФ практически не зависит от

угла падения света на фильтр, после акустооптического взаимодействия энергия фотона определяется из закона сохранения энергии системы фотон-фонон. Но при наклонном падении вероятность взаимодействия падает. Для наглядности на рис. 1, взятом из классической работы [8], показана векторная диаграмма выполнения закона сохранения импульса в системе фотон-фонон для АОФ. Реализованная широкоугольность АОФ составляет около 8° [4].

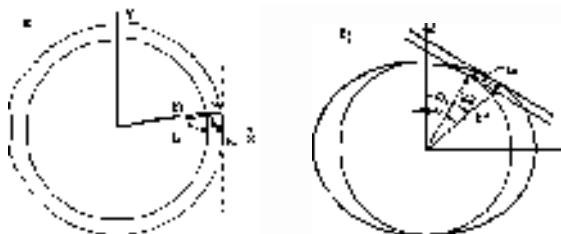


Рис 1. Векторные диаграммы для АОФ при коллинеарном (а) и неколлинеарном (б) взаимодействии, углы Θ_i , Θ_d определяют направления распространения падающего (i) и дифрагированного (d) световых пучков, волновые вектора k_i (k'_i), k_d (k'_d) соответствуют падающей и дифрагированной световой волны для обыкновенного (k_i^o) и необыкновенного (k_d^o) световых лучей. k_a – волновой вектор ультразвука

Акустооптическую ячейку (АОЯ) можно сконфигурировать для получения максимального отклонения оптического излучения, что необходимо в акустооптическом дефлекторе, или сделать практически нулевое отклонение для АОФ. Широугольность фильтрации может быть увеличена в АОЯ с небольшим отклонением, которое будет устранено программно в ходе последующей обработки изображения.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

1. Filatov A.L. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2022. V. 86. No. 11. P. 1654.
2. Filatov A.L. // Solar-terrestrial physics. 2022. V. 8. No. 3. P. 76.
3. Pustovoit V.I., Pozhar V.E. // Proc.SPIE. 1999. V. 3750. P. 243-249.
4. Perchik A.V. // Proc. SPIE. 2013. V. 8888. P. 88880P.
5. Yushkov K.B., Anikin S.P., Chizhikov S.I., et al. // Acta Physica Polonica A. 2015. No. 11. V. 1. P. 81-83.
6. Korablev O.I., Trokhimovskiy A.Yu., Kalinnikov Yu.K. // Proc. SPIE. 2016. V. 10562. P. 105621M.
7. Kozun M.N., Bourassa A.E., Degenstein D.A., Loewen P.R. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 103106.
8. Chang C. Tunable acousto-optic filters: An Overview // Proc. SPIE. 1976. V. 0090.

М.В. ЦВЕТКОВ, И.Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСТОЧНИКА НЕКОГЕРЕНТНОГО СВЕТА В МЕТОДЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Рассмотрен способ усовершенствования экспериментальной установки, работающей на основе метода нарушенного полного внутреннего отражения путём замены лазерного источника света источником белого света. Описаны результаты эксперимента по определению чувствительности установки. Сделан вывод о дальнейших перспективах исследований в этом направлении.

M.V. TSVETKOV, I.N. PAVLOV

National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

USING INCOHERENT LIGHT SOURCE IN THE METHOD OF FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION

A method for improving an experimental setup operating on the basis of the method of frustrated total internal reflection by replacing a laser light source with a white light source is considered. The results of an experiment to determine the sensitivity of the installation are described. The conclusion is made about the future prospects of research in this direction.

Метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) широко известен в науке и обладает хорошей разрешающей способностью и чувствительностью. Принцип работы метода заключается в подсветке исследуемого объекта на призме широким коллимированным пучком света и дальнейшей регистрации изображения с помощью ПЗС-камеры [1].

Ранее в экспериментальной установке использовался монохроматический источник света (полупроводниковый лазерный модуль с длиной волны 650 нм), что давало свои преимущества и недостатки. Было сделано предположение, что использование источника белого света вместо лазера даст возможность избавиться от спеклов, неизбежно присутствующих на изображениях, получаемых с помощью когерентного источника. Это позволит производить более точный анализ распределения показателя преломления исследуемого объекта по всей площади его контакта с призмой.

В рамках данной работы на экспериментальной установке была произведена замена лазерного источника света на источник белого света, представляющий собой лампу накаливания с коллимирующей оптической системой. После этого проведён эксперимент для выявления преимуществ и недостатков использования данного источника света. Суть эксперимента заключалась в измерении зависимости коэффициента отражения от показателя преломления вблизи критического угла ПВО. Сравнение экспериментальных точек с теоретическими зависимостями, рассчитанными по формулам Френеля, показало, что значения сильно не совпадают. Для того, чтобы увидеть различие зависимостей для разных участков спектра источника, произведён следующий эксперимент, в котором перед камерой ставились светофильтры разных спектров пропускания: красного, синего и зелёного. Обработка результатов эксперимента также не показала хорошего соответствия теоретической кривой и экспериментальных точек, по крайней мере для р-компоненты поляризации падающего излучения. Для s-компоненты получилось довольно хорошее соответствие (рис. 1). Это говорит о том, что для дальнейших исследований необходимо измерять состояние поляризации отражённого излучения.

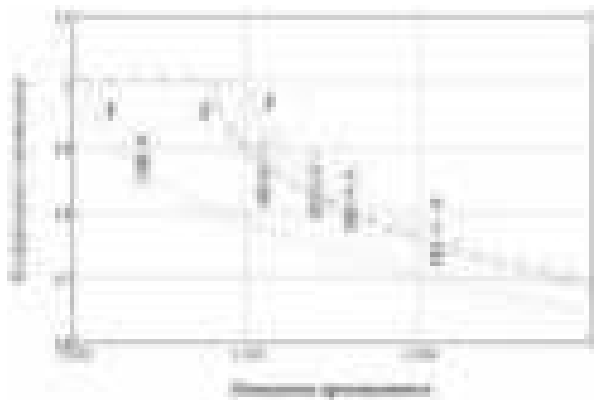


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента отражения от показателя преломления для s-поляризованного излучения: 1 – для $\lambda = 360$ нм, 2 – для $\lambda = 530$ нм, 3 – для $\lambda = 640$ нм

Список литературы

1. Павлов И.Н., Ринкевичюс Б.С и др. // Приборы и техника эксперимента. 2013. С. 130-135.

М.В. АЛОНОВА¹, Д.А. ЗИМНЯКОВ^{1,2}, А.В. СКРИПАЛЬ³,
О.В. УЛЬЯНОВА³, В.А. ФЕДОРОВА³

¹*Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.*

²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

³*Национальный исследовательский Саратовский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ КОДИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НУКЛЕОТИДОВ В СЕКВЕНИРОВАННЫХ ФРАГМЕНТАХ ДНК МИКРООРГАНИЗМОВ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В БИОИНФОРМАТИКЕ

Представлен метод поляризационного кодирования структуры последовательностей базовых нуклеотидов в секвенированных фрагментах ДНК. Метод основан на представлении структуры последовательностей в форме двумерных фазомодулирующих транспарантов и их считывании когерентным пучком с заданным состоянием поляризации. Идентификация последовательностей осуществляется с использованием бинарных карт предельных локальных состояний поляризации дифрагировавшего пучка.

M.V. ALONOVA¹, D.A. ZIMNYAKOV^{1,2}, A.V. SKRIPAL³,
O.V. ULIANOVA³, V.A. FEDOROVA³

¹*Yury Gagarin State Technical University of Saratov*

²*Institute for Precision Mechanics and Control Problems of the RAS, Saratov*

³*Saratov State University (National Research University)*

POLARIZATION ENCODING OF THE STRUCTURE OF NUCLEOTIDE SEQUENCES IN SEQUENCED DNA FRAGMENTS OF MICROORGANISMS: PROSPECTS FOR APPLICATIONS IN BIOINFORMATICS

A method for polarization coding of the structure of base nucleotide sequences in sequenced DNA fragments is presented. The method is based on structure representation in the form of 2D phase-modulating transparencies and their reading by a coherent beam with a given polarization state. Sequence identification is carried out using binary maps of extreme local polarization states in the diffracted beam.

Наряду с компьютерным анализом структуры последовательностей базовых нуклеотидов (аденина (А), цитозина (С), тимина (Т), гуанина (G))

в секвенированных фрагментах ДНК различных биологических объектов (например, [1, 2]), для решения задач идентификации в биоинформатике могут быть использованы когерентно-оптические и поляризационные методы кодирования и обработки информации.

Предложен метод [3] поляризационного кодирования и анализа структуры нуклеотидов А, С, Т, G на основе преобразования структуры анализируемых последовательностей в двумерные фазомодулирующие транспаранты. Каждый элемент транспаранта ассоциируется с одним из четырёх базовых нуклеотидов, а глубина модуляции фазы считывающего когерентного пучка определяется содержанием нуклеотида в триплетях (группах из трёх нуклеотидов, формирующих последовательность). Считывание информации с транспаранта осуществляется пучком лазерного излучения, состоящим из двух ортогонально поляризованных составляющих с заданной разностью фаз между ними, а анализ локальных состояний поляризации дифрагировавшего на транспаранте пучка осуществляется в фокальной плоскости фурье-преобразующей линзы. В результате анализа определяются локальные значения нормированных компонентов вектора Стокса (рис. 1). Показано, что бинарные распределения предельных состояний поляризации (рис. 2) могут быть использованы в качестве уникальных идентификаторов структуры анализируемых последовательностей нуклеотидов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-21-00194.

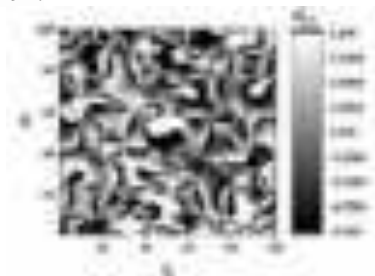


Рис. 1. Распределение локальных значений 4-го компонента вектора Стокса для штамма «Зайр» вируса африканской чумы свиней (результаты моделирования)

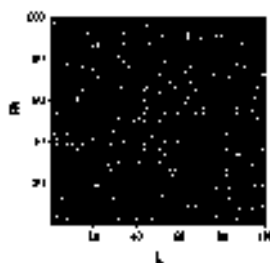


Рис. 2. Бинарное распределение предельных ($s_{k,m}^3 < -0.99$) значений 4-го компонента вектора Стокса для распределения с рис. 1

Список литературы

1. Kumar S, Kumar G, et. al. // Briefings in Bioinformatics. 2022. V. 23 (5). P. 326.
2. Goodwin S, McPherson J., et. al. // Nature Reviews Genetics. 2016. V. 17. P. 333.
3. Zimnyakov D., Alonova M., et. al. // J. of Biomedical Photonics&Eng. 2022. V. 8. P. 040302.

В.О. ЧЕРЕШНЕВ, С.Г. ПРОСКУРИН
Тамбовский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКЛОВ В ФАНТОМАХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ

Представлены результаты исследования закономерностей распределения спеклов в фантомах биологических тканей в оптической когерентной томографии, в ходе которого произведён количественный анализ спеклов ОКТ-изображений на основе подгонки бета-распределения, демонстрирующий эффективность при дифференциации различных типов структур.

V.O. CHERESHNEV, S.G. PROSKURIN
Tambov State Technical University

RESEARCH OF REGULARITIES OF THE DISTRIBUTION OF SPECKLES IN PHANTOMS OF BIOLOGICAL TISSUES IN OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY

The paper presents the results of a study of the distribution patterns of speckles in phantoms of biological tissues in optical coherence tomography, during which a quantitative analysis of speckles in OCT images based on fitting the beta distribution was performed, demonstrating efficiency in differentiating different types of structures.

Закономерности формирования регистрируемого сигнала оптического когерентного томографа (ОКТ) в зависимости от вклада фотонов с кратностями рассеяния различных порядков определяют глубину когерентного зондирования при отражении и диффузном прохождении фотонов через рассеивающую среду.

Целью работы является исследование локальных вариаций спеклов ОКТ-изображений, при котором измеряются средние изменения рассеивающих свойств ткани путём анализа гистограмм, соответствующих различным участкам изображения.

В качестве моделей биологических объектов использовались фантомы с оптическими свойствами, близкими к реальным биологическим тканям и капиллярным сетям. Для исследования использовались несколько прямоугольных областей одинакового размера, соответствующих участкам стенке гидродинамического фантома, области свободного пространства и потоку рассеивателей в жидкости. В дальнейшем полученные

гистограммы усреднялись по нескольким последовательно записанным изображениям для минимизации погрешности и поиска правильного вида закономерности, а также аппроксимировались методом наименьших квадратов с различными функциями распределения.

Наилучшую точность аппроксимации показало бета-распределение $R^2 \sim 0,95$, демонстрируя чёткие различия в распределении интенсивностей спеклов и параметров бета-распределения, которые составили $\alpha \sim 1,7$, $\beta \sim 20,5$ для области свободного пространства, $\alpha \sim 3,1$, $\beta \sim 5,5$ для стенки гидродинамического фантома, $\alpha \sim 2,6$, $\beta \sim 1,7$ для потока рассеивателей в жидкости. Результаты аппроксимации гистограмм представлены на рис. 1.

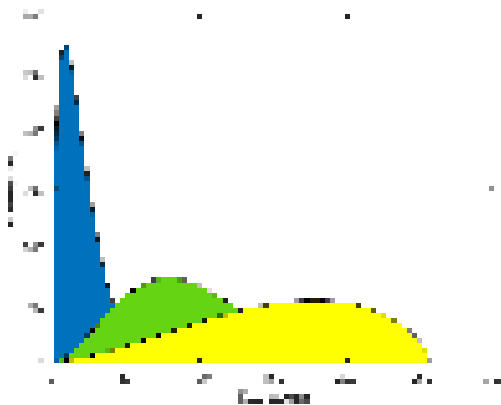


Рис. 1. Гистограммы интенсивности спеклов, аппроксимированные функцией бета-распределения, соответствующих областям: свободное пространство (слева); стенка гидродинамического фантома (центр); поток рассеивателей в жидкости (справа)

Список литературы

1. Черешнев В.О., Романенко И.М., Кулешов И.В., Проскурин С.Г. Дифференциация структур кожи, кровеносных сосудов и крови посредством построения вариационной матрицы ОКТ изображения // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 10-2. С. 319-323.
2. Черешнев В.О., Абдулкарим С.Н., Проскурин С.Г. Исследование отраженных и малократно рассеянных фотонов посредством построения матрицы дисперсий ОКТ изображений // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 12-1. С. 118-122.
3. Черешнев В.О., Фролов С.В., Потлов А.Ю., Проскурин С.Г. Построение изображений оптической когерентной томографии биологических тканей на основе анализа интенсивности пикселей // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2019. № 3 (31). С. 104-112.

П.В. ПАВЛОВ, А.П. ВЛАДИМИРОВ^{1,2}, А.Р. СТЕПАНОВ

*Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

¹*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург*

²*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДИФFUЗНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ ЦИФРОВЫХ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИЙ

Рассматриваются результаты испытаний разработанного способа и устройства определения величины перемещения элементов остекления при создании избыточного давления внутри кабины самолёта.

P.V. PAVLOV, A.P. VLADIMIROV^{1,2}, A.R. STEPANOV

*Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin», Voronezh*

¹*Institute of Mechanical Engineering of Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg*

²*Ural Federal University, Ekaterinburg*

DETERMINING THE VALUE OF MOVEMENT OF DIFFUSE OBJECTS FROM THE ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF DIGITAL SPECKLE PHOTOGRAPHY

The results of tests of the developed method and device for determining the amount of movement of glazing elements when creating excess pressure inside the aircraft cabin are considered.

Применение метода спекл-структур оптического излучения в различных сферах диагностики говорит о его высокой чувствительности и эффективности [1 - 3]. В ранее опубликованных работах рассматривались возможности применения данного инструмента неразрушающего контроля для определения параметров дефектов органического авиационного стекла и клевого соединения между оргстеклом и лавсановой лентой крепления остекления к корпусу воздушного судна [4]. Однако не проводилась оценка использования предлагаемого способа [5] для определения величины перемещения элементов остекления при создании избыточного давления внутри кабины воздушного судна.

В качестве параметра, по которому возможно оценить движение элементов остекления в ходе создания избыточного давления внутри

кабины, можно использовать коэффициент корреляции η участков спекл-полей, зарегистрированных от участков остекления при создании избыточного давления. При этом имеет место перемещение непрозрачной части остекления (слой герметика на стыке корпуса самолёта и стекла), а также прозрачного стекла относительно корпуса самолёта. Величина перемещения непрозрачной части остекления в отсутствие деформаций и поворотов согласно будет соответствовать линейному разрешению линзы, если значение η станет равным нулю. Влияние деформаций на величину η можно исключить, выбрав направления освещения и наблюдения симметрично нормали поверхности, однако влияние макроскопического поворота поверхности в любом случае остается. В этом случае для разделения двух вкладов на динамику спеклов, последние следует регистрировать, используя два лазера с разными длинами волн.

Если значение η достигло нуля или стало отрицательным, то материал перешёл в состояние предразрушения. Минимальное значение η в оптической неоднородности, зарегистрированные до и в процессе эксплуатации остекления, можно использовать в качестве параметров, характеризующих их повреждённость. Доработанный программный модуль [6] позволит значительно уменьшить число допускаемых ошибок в ходе измерения величины выхода остекления из заделки при проверке герметичности кабины.

Список литературы

1. Петров Н.В., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Солдатов Ю.И. Определение скорости движения объекта в воде с использованием метода цифровой спекл-фотографии // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 70-73.
2. Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. Вып. 5. С. 870-880.
3. Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Каманцев И.С., Павлов П.В., Евсин А.О. Спекл-диагностика элементов остекления кабин воздушных судов из органического стекла // Авиационная промышленность. 2021. № 3-4. С. 97-103.
4. Степанов А.Р., Павлов П.В., Артанов В.В. Определение внутренних дефектов в элементах конструкции кабин самолетов методом спекл-структур оптического излучения // Сборник научных трудов XI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: М.: НИЯУ МИФИ. 2022. С. 601-602.
5. Павлов П.В., Вольф И.Э., Степанов А.Р., Евсин А.О., Хакимов Л.Н. Патент РФ № 2759038. Оpubл. 09.11.2021. Бюл. № 31.
6. Павлов П.В., Лагошный И.С., Вольф И.Э., Евсин А.О., Степанов А.Р., Неупакова А.В. Свидетельство РФ № 2020619977 от 26.08.2020.

Н.О. ПРОХОРОЕНКОВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНОПЕРЕДАЧИ ОТ ТЕСТ-ОБЪЕКТА К ИЗОБРАЖЕНИЮ ПРИ ЗАПИСИ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАММЫ НА НЕСКОЛЬКИХ ДЛИНАХ ВОЛН

В данной работе приведены результаты исследования влияния многоволнового метода записи цифровых голограмм (ЦГ) Френеля на тонопередачу от исследуемого объекта к его изображению. Получена зависимость значения тонопередачи от ширины спектра записи ЦГ и значения интенсивности.

N.O. PROHORENKOV, M.A. VOLYNSKY
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF TONE RENDERING FROM TEST-OBJECT TO IMAGE WHEN DIGITAL HOLOGRAM RECORDED BY MULTIPLE WAVELENGTHS

The results of the study on influence of multiwavelength recording approach of digital holograms (DH) of Fresnel on the tone rendering from object to its image are presented. The dependence of the tone rendering value on the DH width of recording spectrum and value of intensity is obtained.

Голография – это метод регистрации амплитуды и фазы волнового фронта (ВФ), отражённого от объекта, при помощи записи интерференционной картины, полученной в результате взаимодействия референтного и объектного ВФ в плоскости записи голограммы [1, 2]. Цифровая голография, в свою очередь, является одним из её направлений, в котором обработка записанных голограмм ведётся при помощи электронно-вычислительных машин [3]. В настоящее время это находит применение в таких областях, как материаловедение и биомедицина [3], а также микроскопия и метрология [4].

Целью данного исследования является изучение влияния записи цифровых голограмм (ЦГ) на нескольких длинах волн на передачу тона от исходного объекта к его изображению. Для её достижения реализуется модель записи ЦГ Френеля. Рабочий диапазон длин волн принимается от красного ($\lambda = 885$ нм) до зелёного ($\lambda = 550$ нм) цветов спектра видимого света. Восстановление изображения тест-объекта ведётся на средней из заданного диапазона длине волны.

Для достижения поставленной цели был смоделирован тест-объект размером 512 x 512 отсчётов, содержащий все возможные градации серого цвета в диапазоне [0, 255] (рис. 1). После этого была произведена запись набора ЦГ в пределах заданного диапазона и моделирование итоговой ЦГ. Затем из неё восстанавливалось изображение тест-объекта. Дополнительно над полученным изображением совершалась операция постобработки для исключения влияния масштабных преобразований на искомую зависимость тонопередачи.

В качестве значения тонопередачи принималось отношение интенсивности на изображении к интенсивности на объекте. Как можно судить из рис. 2, при данном методе записи ЦГ более высокие значения интенсивности передаются лучше, чем низкие при любой ширине диапазона записи. Также, поскольку преобладающие значения тонопередачи лежат в диапазоне от [0.2 - 0.5], полученное изображение будет являться более тёмным по отношению к тест-объекту.

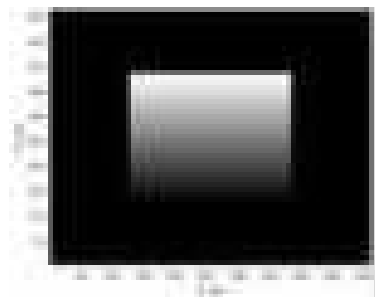


Рис. 1. Тест-объект

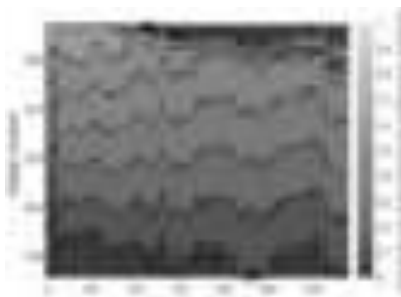


Рис. 2. Зависимость тонопередачи от ширины спектра при записи ЦГ и исходного тона объекта

Список литературы

1. Перминов А.В., Файзрахманова И.С. Прикладная голография: курс лекций. Пермь: Из-во ПНИПУ, 2017.
2. Tatsuki T., et al. Multiwavelength digital holography with wavelength-multiplexed holograms and arbitrary symmetric phase shifts // Optics Express. 2017. V. 25. No. 10.
3. Гендин В.Г. Формирование и анализ параметров когерентных световых полей методами цифровой голографии для бесконтактного контроля объектов. Диссертация канд. техн. наук. Санкт-Петербург: СПб НИУ ИТМО, 2013.
4. Kim M.-K. Applications of digital holography in biomedical microscopy // J. Opt. Soc. Korea. 2010. V. 14. P. 77-89.

П.А. ИВАНОВ

Ярославский государственный технический университет

**МЕТОДЫ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНВАРИАНТНЫХ
MOSSE-ФИЛЬТРОВ**

Приводятся результаты моделирования на ПЭВМ распознавания двумерных полутоновых изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям, с помощью составных фильтров.

P.A. IVANOV

Yaroslavl State Technical University

**METHODS OF CORRELATION IMAGE RECOGNITION
WITH HELP OF INVARIANT MOSSE-FILTERS**

The results of PC modeling of 2D grayscale images with geometrical deformations recognition with the usage of invariant correlation filters are given.

Важной задачей оптической обработки информации является задача распознавания изображений. Одним из наиболее широко в настоящее время используемых схемотехнических решений таких задач, является оптико-электронный коррелятор изображений [1]. Основной функцией данного устройства является вычисление корреляционной функции входных данных с эталонным объектом. К сожалению, выбор в качестве эталона оригинала распознаваемого изображения является крайне неудачным. Довольно привлекательным и популярным вариантом выбора эталона является применение составного инвариантного корреляционного фильтра [2].

В данной работе в качестве объекта исследования использовался инвариантный корреляционный фильтр (КФ) типа: MOSSE. В качестве среды моделирования был выбран пакет Matlab Mathworks, как наиболее подходящий для подобного рода задач. Для каждого случая вычислялись значения корреляционных функций (1), нормированных на величину максимального пика (количественные характеристики), а также качественные характеристики корреляции:

$$C(x_c, y_c) = \iint_{\pm\infty} f_{эм}^*(x, y) * f_{ex}(x - x_c, y - y_c) dx dy \quad (1)$$

Здесь * – обозначает комплексное сопряжение, $f_{эм}$ и f_{ex} – эталонное (фильтр) и входное изображения, соответственно. Аналитический вид эталонного объекта (КФ):

$$h = \left(\sum_{i=1}^N X_i * X_i^* \right)^{-1} * \sum_{i=1}^N X_i g_i^* \quad (2)$$

X – диагональная матрица, на главной диагонали стоят преобразование Фурье исходного изображения, g – вектор, представляющий из себя желаемый корреляционный пик.

Таким образом, в работе проведён синтез на ПЭВМ инвариантных корреляционных фильтров и приводятся результаты применения этого типа КФ для задач распознавания 2D-изображений, подвергнутых геометрическим преобразованиям поворота, изменения масштаба, а также межклассовому распознаванию таких объектов на основе базы данных из [2]. Результаты моделирования показывают возможность успешного применения КФ для задач распознавания изображений, подвергнутых преобразованию изменения масштаба, а также межклассовому распознаванию объектов, подвергнутым этому типу преобразования.

Список литературы

1. Евтихийев Н.Н., Евтихьева О.А., Компанец И.Н., Краснов А.Е., Кульчин Ю.Н., Одинокоев С.Б., Ринкевичюс Б.С. Информационная оптика. М.: Издательство МЭИ, 2000.
2. Ivanov P.A. Modeling of scaled and rotated images recognition using different variants of invariant correlation filters // Proceedings of SPIE. 2016, V. 9845. P. 9845OT.

А.О. ГАУГЕЛЬ, А.В. ПАВЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

АППРОКСИМАЦИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СХЕМЫ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ГОЛОГРАММ

Предложена и обоснована аппроксимация передаточной характеристики 4f-схемы голографии Фурье для высокочастотных голограмм моделью «разность экспонент». Показана адекватность подхода при измерении радиуса отклика.

A.O. GAUGEL, A.V. PAVLOV
ITMO University, Saint-Petersburg

APPROXIMATION OF THE TRANSFER CHARACTERISTIC OF THE FOURIER HOLOGRAPHY SCHEME FOR HIGH-FREQUENCY HOLOGRAMS

An approach to the approximating the transfer characteristic of the 4f Fourier holography scheme for high-frequency holograms by the «Difference of Exponents» model, including «Difference of Gaussians» is proposed and verified numerically.

Передаточной характеристикой 4f-схемы голографии Фурье для +1-го порядка дифракции $H(\nu)$ примем измеряемую по интенсивности зависимость локальной дифракционной эффективности (ДЭ) голограммы от пространственной частоты $\eta(\nu)$. В [1] предложен и обоснован подход к аппроксимации передаточной характеристики и корреляционного отклика гауссово-подобной моделью. Однако данный подход применим только для голограмм, у которых максимум ДЭ локализован на нулевой частоте. Если частота равенства локальных амплитуд сигнального и опорного пучков при записи голограммы отлична от нуля, то $\eta(\nu)$ характеризуется «провалом» ДЭ в области нулевых частот и подход [1] неадекватен.

Для высокочастотных голограмм аппроксимируем $\eta(\nu)$ моделью

$$\eta(\nu) = a_1 \cdot \exp\left(-\ln(\alpha) \cdot \left(\frac{-\nu}{\nu_{\alpha 1}}\right)^{D_1}\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\ln(\alpha) \cdot \left(\frac{-\nu}{\nu_{\alpha 2}}\right)^{D_2}\right), \quad (1)$$

где α – уровень измерения радиуса. При $\alpha = 0.606$ и $D_1 = D_2 = 2$ имеем модель DOG (Difference of Gaussians), удобную для аналитического описания.

Традиционный подход к аппроксимации по критерию минимума среднего квадрата ошибки, в общем, даёт неадекватные результаты как для $\eta(\nu)$, так и для отклика схемы в корреляционной плоскости. Но в ряде моделей обработки, например, при реализации нечётких логик, требуется измерение не интенсивности корреляционного отклика, а его радиуса. В этом случае параметры аппроксимирующей функции (1) могут быть подобраны по критерию минимума ошибки измерения радиуса отклика.

На рис. 1а даны примеры аппроксимации экспериментально измеренной зависимости $\eta(\nu)$ моделью DOG по критерию минимума ошибки радиуса корреляционного отклика по разным уровням измерения, зависимости относительной ошибки от уровня приведены на рис. 1б.

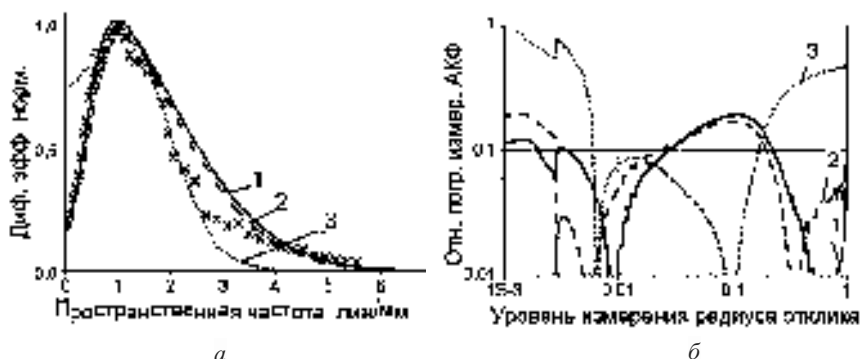


Рис. 1. Аппроксимация моделью DOG: передаточной характеристики (а), относительная погрешность корреляционного отклика; оптимизация для уровня отклика (б): точки – экспериментальные данные, $\alpha = 0.606$ (1), $\alpha = 1/e$ (2), $\alpha = 0.1$ (3)

Таким образом, хотя модель DOG даёт неадекватную аппроксимацию зависимости $\eta(\nu)$ в целом (рис. 1а), но она позволяет получить высокую точность аппроксимации радиуса корреляционного отклика по заданному уровню его измерения (рис. 1б). Этот результат актуален как для задачи аналитического описания схемы, так как модель DOG даёт достаточно компактные и наглядные результаты, так и для компьютерной голографии, включая синтез цифровых корреляционных фильтров [2], в плане снижения требований к мощности процессора.

Список литературы

1. Павлов А.В., Гаугель А.О., Алексеев А.М. Подход к аппроксимации передаточной характеристики и корреляционного отклика схемы голографии Фурье // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 9. С. 1389-1396.
2. Евтихийев Н.Н. и др. // Квантовая электроника. 2020. Т. 50 (7).С. 667.

И.В. САЕЧНИКОВ, В.В. СКАКУН, Э.А. ЧЕРНЯВСКАЯ
Белорусский государственный университет, Минск

**КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ
И СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ В ОПТИЧЕСКОМ ПОТОКЕ
НА БАЗЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

В данной работе представлен комбинированный метод идентификации и анализа семантических образов динамических объектов для оптического потока. Метод включает четыре этапа: формирование карты признаков изображения, детектирование областей интереса, создание четырёхмерного пространства для пар пикселей потенциальных областей интереса, последующее обновление корреляционного поля потока на базе управляемого рекуррентного блока.

I.V. SAETCHNIKOV, V.V. SKAKUN, E.A. TCHERNIAVSKAIA
Belarusian State University, Minsk

**COMBINED ML-BASED TECHNIQUE FOR DYNAMICAL
OBJECTS IDENTIFICATION AND SEMANTIC ANALYSIS
IN OPTICAL FLOW**

In this paper we report the combined method of identification and semantic analysis of dynamic objects in the optical flow. The method includes four stages: generation of image' feature map, detection of regions of interest, creation of four-dimensional space for pixel pairs of potential regions of interest, subsequent updating stage of the correlation field based on gated recurrent unit.

Задача распознавания объектов и их последующий семантический анализ в оптическом потоке является одной из самых насущных задач в компьютерном зрении [1]. Несмотря на достижения в разработке и реализации подобных методов на протяжении последних десяти лет, существующие системы достаточно чувствительны к различного рода окклюзиям [2] и размытию семантических паттернов образов объектов [3]. Данные факторы дополнительно усложняют классическую оптимизационную задачу по расчёту пространства смещений плотности полей между двумя последующими кадрами и последующую задачу регуляризации. Альтернативной данному классическому подходу может стать комбинированные методы на основе машинного и глубокого обучения [4], способного на первом этапе проводить семантический

анализ изображений с вычленением интересующих областей интереса и последующее обучение для задачи прямого прогнозирования потока.

В данной работе мы предлагаем архитектуру комбинированного метода идентификации динамических объектов в оптическом потоке.

Предлагаемый метод состоит из четырёх компонентов.

1) Формирование карты признаков сетью глубокого обучения YOLOv4eff [5]. Сеть, включающая в общем 24 свёрточных слоя, сначала обучается на датасете ImageNet (концепция transfer learning), далее дообучается по размеченным семантическим данным динамических объектов (например, автомобили на VisDrone 2022 [3]). Для получения репрезентационной картинки признаков по разным уровням глубины используется 6 CSP connections для трансфера признаков на последующие слои. Для предотвращения исчезающего градиента в качестве активационной функции предлагается Swish.

2) Детектирование динамических объектов на изображениях методом `ssd_mod` [6] с интегрированной плотной сетью DenseNet S 32, и модулем остаточного прогнозирования для каждого слоя (Res-Block) для облегчения модели и предотвращения взрывных градиентов.

3) Корреляционный слой для создания 4D корреляционного пространства ($W \times H \times W \times H$) пар пикселей, входящих в гипотетическую область наличия динамического объекта (по результатам работы второго компонента), с объединением на последующих фреймах.

4) Рекуррентный update оператор на базе GRU, который извлекает значения из корреляционных объёмов (результаты работы третьего компонента) и итеративно обновляет поле потока.

Стоит отметить, что предложенный алгоритм мотивирован также оптимизационным алгоритмом, использующимся в оптическом потоке. В нашем случае, генератор карты признаков извлекает семантические и пиксельные признаки. Далее корреляционный слой рассчитывает визуальное сходство между пикселями, а оператор обновления имитирует шаги итерационного алгоритма оптимизации.

Список литературы

1. Dobrički T., Oh Y., et al. // 13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). 2022. P. 588-590.
2. Savian S., Mehdi E., et al. // Deep Biometrics. P. 257-287.
3. Chong X., Zhou N., et. al. // 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). 2022. P. 3471-3477.
4. Sun D., Yang X., Liu M.-Y., et al. // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018. P. 8934-8943.
5. Saetchnikov I.V., Skakun V.V. // VIII Belarusian Space Congress. 2022. P. 149-152.
6. Saetchnikov I.V., Skakun V.V. // Computer Technologies and Data Analysis. 2022. P. 64-68.

Д.А. РЫМОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СИНТЕЗ КИНОФОРМОВ ТРЁХМЕРНЫХ СЦЕН НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Реализован метод синтеза киноформов 3D-сцен, основанный на использовании нейронной сети. Проведена оценка качества изображений восстановленных с киноформов, полученных как с помощью обученной нейронной сети, и при использовании метода Герчберга–Сэкстона.

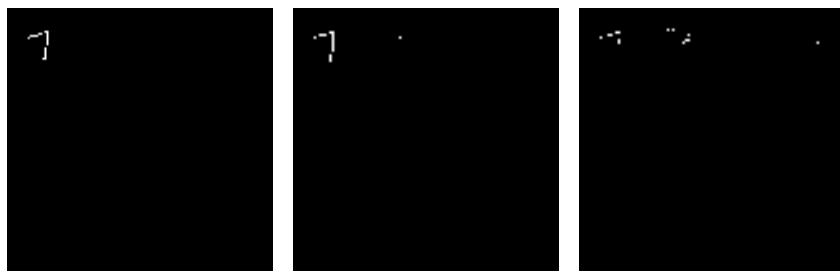
D.A. RYMOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

MACHINE LEARNING-BASED VOLUME SCENE HOLOGRAM GENERATION

A neural-network-based method for 3D-kinofrom generation was developed. Quality of images reconstructed from kinofroms, generated with the trained model was compared against images, reconstructed from kinofroms generated with the Gerchberg–Saxton algorithm.

В настоящее время в областях информационной оптики и голографии активно развиваются методы, основанные на использовании нейронных сетей [1 - 3]. Применение таких методов может значительно уменьшить время, требуемое для расчётов оптических элементов по сравнению с традиционными [2]. В частности, синтез киноформов является достаточно трудоёмкой задачей из-за наличия множества объектных плоскостей, формирующих 3D-сцену. В традиционных итерационных методах расчёт каждой плоскости и их взаимодействия может занимать продолжительное время [4]. Использование же нейронных сетей может позволить допустить существенное сокращение времени расчёта [3, 5].

Для демонстрации работы метода нейронная сеть была обучена синтезу киноформов 3D-сцен, содержащих 16 объектных плоскостей разрешением 512×512 пикселей. На рис. 1а представлен пример одного из сечений оригинальной 3D-сцены, на рис. 1б и 1в – изображения, восстановленные с киноформов, рассчитанных с помощью обученной модели нейронной сети и метода Герчберга–Сэкстона (ГС) соответственно.



а б в
Рис. 1. Пример оригинального изображения сечения 3D-сцены (а) и восстановленных с киноформ, синтезированных с помощью обученной модели (б) и метода Герчберга–Сэкстона (в)

Как видно, изображение, полученное с использованием обученной модели, даёт более чёткий контур объекта, а также содержит меньше информации о других объектных плоскостях. Коэффициент корреляции для восстановленного изображения с киноформа, синтезированного нейросетью, составил $0,60 \pm 0,03$, а для рассчитанного методом Герчберга–Сэкстона – $0,45 \pm 0,09$ (среднее по 16 плоскостям для 100 киноформов). Полученные результаты демонстрируют возможность оперативного и качественного синтеза киноформов объёмных сцен с использованием машинного обучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Liu T., de Haan K., Rivenson Y., et al. Deep learning-based superresolution in coherent imaging systems // *Sci. Rep.* 2019. V. 9. P. 3926.
2. Jo Y., Cho H., Lee S., et al. Quantitative phase imaging and artificial intelligence: a review // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2018. V. 25 (1). P. 1-14.
3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Machine learning methods for digital holography and diffractive optics // *Procedia Computer Science.* 2020. V. 169. P. 440-444.
4. Кулаков М.Н., Поршнева Л.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Расчет киноформов объёмных сцен методом «пинг-понг» // *Сборник трудов V Международной конференции по фотонике и информационной оптике.* М: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 454-455.
5. Eybposh H.M., Caira N.W., Atisa M., Chakravarthula P., Pégard N.C. Deep CGH: 3D computer-generated holography using deep learning // *Optics Express.* 2020. V. 28. P. 26636-26650.

М.А. ГОРЯЕВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург*

ВЛИЯНИЕ КРАСИТЕЛЯ НА ФОТОЭДС КРЕМНИЕВОЙ n-p-n⁺ СТРУКТУРЫ

Исследованы спектры фотоЭДС в *n-p* структуре кремния с нанесённым на поверхность красителем и окисью сурьмы. Краситель изменяет спектральное распределение фотоэффекта в результате взаимодействия с поверхностью полупроводника, а окись сурьмы уменьшает его величину на порядок.

М.А. GORYAEV

Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg

DYE INFLUENCE ON THE PHOTO-EMF OF THE SILICON n-p-n⁺ STRUCTURE

The photo-EMF spectra in the silicon *n-p* structure with a dye and the Sb oxide applied on the semiconductor surface are investigated. The dye changes the spectra of the photovoltaic effect as result of interaction with semiconductor surface, and the Sb oxide decreases its value by the order of magnitude.

В фотоэлектрических преобразователях солнечной энергии [1] и в ПЗС-матрицах систем регистрации изображений [2] широко используются кремниевые структуры различного строения. Органические красители эффективно сенсибилизируют фотопроводимость на постоянном токе в порошкообразном кремнии [3] и фотоЭДС в монокристаллическом кремнии [4]. В данной работе исследовались спектры фотоЭДС в монокристаллической структуре на основе кремния: полупроводниковая подложка *n*⁺-типа (толщина 500 микрон) с нанесёнными слоями *p*-типа (толщина 20 микрон) и *n*-типа (толщина 1 микрон) и влияние на фотовольтаический эффект в такой структуре нанесённых на поверхность слоёв органического красителя и окиси сурьмы.

Измерения фотоЭДС образцов проводилось конденсаторным методом [5] при модулированном освещении. Для оценки эффективности внутреннего фотоэффекта измеряемые сигналы ΔU нормировались на одинаковое количество падающих на образец квантов света. На рис. 1 представлены спектры фотоЭДС исходной структуры кремния (кривая 1)

и образцов с нанесёнными на полупроводник слоями родамина 6Ж с поверхностными концентрациями молекул красителя 30 нм^{-2} (кривая 2) и 60 нм^{-2} (кривая 3) и диэлектрическим слоем окиси Sb толщиной 5 нм (кривая 4).

Изменение величины фотоэффекта и его спектров при нанесении красителя на поверхность полупроводника (кривые 2 и 3), как и в случае более простой *n-p* структуры [6], может быть связано со сменой знака фотопотенциала в результате взаимодействия красителя с поверхностью кремния при освещении в разных областях спектра [7]. Сенсibilизации фотоэффекта не наблюдается, так как критический радиус переноса энергии от красителя полупроводнику составляет 6 - 8 нм [8], и эта энергия не достигает гетероконтакта. А при увеличении концентрации красителя (кривая 3) заметен фильтровой эффект в области поглощения красителя [5].

При нанесении на поверхность слоя окиси Sb наблюдается уменьшение фотоэффекта на порядок (кривая 4), а влияние красителя практически отсутствует, что может быть связано с формированием в полупроводнике антизапорного изгиба зон, как это происходит при нанесении на кремний слоёв сложных халькогенидов системы Ge-Sb-Te [9, 10].

Автор благодарен Коссову В.Г. и Иванову В.А. за предоставленные образцы кремниевых структур и Каблуковой Н.С за нанесение слоёв Sb.

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937.
2. Boyle W.S. // Rev. Modern Physics. 2010. V. 82. No. 3. P. 2305.
3. Горяев М.А. // Журнал физической химии. 2015. Т. 89. № 12. С. 1940.
4. Горяев М.А. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 127. № 7. С. 167
5. Акимов И.А. // Оптико-механическая промышленность. 1966. № 5. С. 4.
6. Горяев М.А. // XI Межд. конф. по фотонике и информац. оптике: сб. научн. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2022. С. 239.
7. Комолов С.А., Герасимова Н.Б. и др. // Журнал техн. физики. 2006. Т. 76. № 7. С. 76.
8. Акимов И.А., Черкасов Ю.А., Черкашин М.И. Сенсibilизированный фотоэффект. М.: Наука, 1980.
9. Горяев М.А., Кастро Р.А. и др. // IX Межд. конф. по фотонике и информац. оптике: сб. научн. трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 427.
10. Castro-Arata R., Goryaev M.A., et al. // Proc. 8th Intern. Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS 2020). 2020. P. 146.

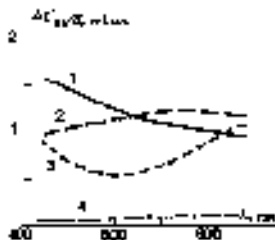


Рис. 1. Спектры фотоЭДС

У.К. МАХМАНОВ^{1,2}, Ш.А. ЭСАНОВ¹, К.Н. МУСУРМОНОВ¹,
А.Х. ШУКУРОВ¹, Й. ДУСОВ³, С. ЭШБОЕВ³

¹*Институт ионно-плазменных и лазерных технологий Академии наук Республики
Узбекистан, Ташкент*

²*Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент*

³*Термезский государственный университет, Термез, Узбекистан*

ОПТИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА ФУЛЛЕРЕНА C₆₀ В БИНАРНЫХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

Представлены результаты экспериментов по формированию нанокластеров фуллерена C₆₀ в системе гексан/бензол. Установлены эффекты самоорганизации молекул C₆₀ на оптические свойства раствора, определены размерные и структурные характеристики нанокластеров C₆₀.

U.K. MAKHMANOV^{1,2}, S.A. ESANOV¹, K.N. MUSURMONOV¹,
A.Kh. SHUKUROV¹, Y. DUSOV³, S. ESHBOEV³

¹*Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Uzbekistan Academy of Sciences,
Tashkent*

²*National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Tashkent*

³*Termiz State University, Termiz, Uzbekistan*

OPTICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF FULLERENE C₆₀ IN BINARY SOLVENTS

The results of experiments on the formation of C₆₀ fullerene nanoclusters in the hexane/benzene system are presented. The effects of self-organization of C₆₀ molecules on the optical properties of the solution are established, and the dimensional and structural characteristics of C₆₀ nanoclusters are determined.

Наноразмерная углеродсодержащая молекула фуллерена C₆₀ привлекает внимание ученых благодаря своим уникальным свойствам, позволяющим использовать их в различных областях науки и техники, включая медицину, современную электронику, материаловедение, нанотехнологии и другие области [1, 2]. Растворы фуллерена C₆₀ в органических растворителях можно рассматривать как коллоидные системы, поскольку известна склонность молекулы фуллерена к образованию кластеров в различных растворителях [3, 4]. В этом случае свойства синтезированных наноразмерных кластеров становятся зависимыми от их геометрических размеров и заметно отличаются от

аналогичных свойств составляющих их индивидуальных мономеров C_{60} [5 - 7]. В то же время многие вопросы о межмолекулярных взаимодействиях, приводящих к кластеризации молекул фуллерена C_{60} в бинарных растворах, остаются дискуссионными.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование оптических свойств (УФ видимые спектры поглощения и показатель преломления) растворов фуллерена C_{60} в бинарных смесях растворителей «гексан+бензол» и размерных характеристик (данные динамического рассеяния света (ДРС) и снимки электронной микроскопии) кластеров C_{60} в растворах при комнатной температуре. В экспериментах были использованы кристаллические порошки фуллерена C_{60} чистотой > 99,8 %, а также органические растворители – гексан (C_6H_{14}) и бензол (C_6H_6) чистотой ~ 99 %. Все используемые реагенты были приобретены от Sigma Aldrich (США).

Методом рефрактометрии экспериментально установлено, что с увеличением концентрации фуллерена C_{60} и объёмной доли бензола в растворе C_{60} /гексан/бензол значения показателя преломления раствора увеличиваются. Такое поведение связано с тем, что увеличение числа связей, образующихся между молекулами «растворённое вещество-растворённое вещество» и «растворённое вещество-растворитель», вызывает больше взаимодействий с фотонами и приводит к увеличению показателя преломления среды.

Увеличение концентрации C_{60} в системе C_{60} /гексан/бензол приводит к значительным изменениям переноса заряда между C_{60} и растворителем, в частности, проявляют как положительный сольватохромный эффект, так и гипохромный эффект в полосе интенсивного оптического поглощения при ~ 330,2 нм. После замены бензола в бинарном растворе распределение заряда π -электронов фуллерена C_{60} в возбуждённом электронном состоянии существенно отличается от такового в основном состоянии молекул. При этом происходит реорганизация молекул C_{60} в растворе. Этот факт был подтверждён на основании экспериментальных результатов ДРС и электронной микроскопии.

Список литературы

1. Kirtane A.R., et al. // Nat. Nanotechnol. 2021. V. 16. P. 369-384.
2. Yin H., Lin H., et al. // Org. Electron. 2021. V. 93. P. 106142.
3. Mchedlov-Petrosyan N.O. // Chem. Rev. 2013. V. 113. P. 5149-5193.
4. Makhmanov U.K., et.al. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 2081-2084.
5. Qu Y., Liang S., et al. // Mater. Lett. 2011. V. 65. P. 562-564.
6. Cid A., Moldes O., et al. // ACS Omega. 2017. V. 2. P. 2368-2373.
7. Makhmanov U.K., et al. // Fuller. Nanotub. Carbon Nanostructures. 2022. V. 30. P. 80-84.

П.А. БЕЗРУКОВ¹, А.В. НАЩЕКИН², А.И. СИДОРОВ^{1,3}

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург*

³*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

КВАНТОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВОДЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НАНОПОРИСТЫХ СЛОЁВ ЙОДИДА МЕДИ

Показано, что увеличение времени синтеза слоёв меди и времени последующего йодирования слоёв увеличивает квантовую эффективность разложения воды под действием излучения в УФ и видимой областях при различных значениях приложенного напряжения. Максимальная квантовая эффективность при времени синтеза медных слоёв 30 с, а времени йодирования 20 мин составляет 0.37 %.

P.A. BEZRUKOV¹, A.V. NASHEKIN², A.I. SIDOROV^{1,3}

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

³*Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI"*

QUANTUM EFFICIENCY OF PHOTOCATALYTIC WATER SPLITTING BY CHANGING CONDITIONS OF COPPER IODIDE NANOPOROUS LAYERS

Increasing the synthesis time of copper iodide and the synthesis time of subsequent iodization of layers increases the quantum efficiency of water splitting under a radiation action (320 - 500 nm) at different values of the applied voltage. The maximum quantum efficiency with a time synthesis of copper layers of 30 s and an iodization time of 20 min is 0.37 %.

Использование солнечной энергии определяет основную перспективу развития энергетики и экономики будущего как источник чистой, неисчерпаемой энергии. Фотокаталитическое разложение воды – один из современных способов преобразования солнечной энергии на стыке энергетических и экологических трендов технологического развития. Активные формы кислорода, образующиеся при взаимодействии фотогенерированных дырок с растворённым в воде кислородом, могут

разрушать примесные соединения в сточных водах. А фотогенерированные электроны участвуют в реакции восстановления водорода, который может использоваться в качестве топлива. Материал фотокатода способен поглощать энергию солнечного света в широком диапазоне длин волн.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование фотокатодов – нанопористых плёнок иодида меди. Нанопористые медные слои получали методом реакции замещения на железных подложках в течение 5, 15 и 30 с из водных растворов сульфата меди (50 г/л). Йодирование в парах иода производилось в течение 5, 10 и 20 мин. Квантовая эффективность разложения воды исследовалась за счёт фиксирования изменения фототока в момент начала облучения излучением (320 - 500 нм) при постоянном приложенном напряжении. Увеличение времени синтеза нанопористого слоя меди увеличивает квантовую эффективность разложения воды в 1.3 и 2.6 раз до значений 0.2 и 0.39 % при приложенном напряжении 3 В (рис. 1а). Увеличение времени йодирования при постоянной толщине нанопористого слоя меди, увеличивает квантовую эффективность разложения воды до максимального значения 0.37 % при приложенном напряжении 5 В (рис. 1б).

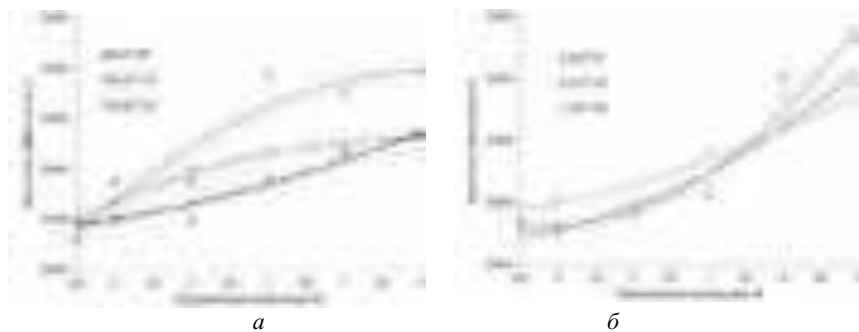


Рис. 1. Зависимость квантовой эффективности разложения воды от величины приложенного напряжения: при изменении времени синтеза нанопористых слоёв меди (а); при изменении времени йодирования слоёв меди (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00559).

А.П. БОЙЧЕНКО, В.А. ЛИФИРЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ
АЛЮМИНИЯ НА КИНЕТИКУ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ЕГО ОКСИДА ПРИ АНОДИРОВАНИИ
В ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЕ**

На примере отожжённого алюминия при температурах 623, 723 и 823 К зарегистрирована разноинтенсивная электролюминесценция (ЭЛ) его оксида, формируемого при высоковольтном анодировании металла в дистиллированной воде. Показано, что изменение кристаллической структуры металла при его термообработке существенно влияет на кинетику ЭЛ.

A.P. BOYCHENKO, V.A. LIFIRENKO
Kuban State University, Krasnodar

**EFFECT OF PRELIMINARY THERMAL TREATMENT
OF ALUMINUM ON THE ELECTROLUMINESCENCE
KINETICS OF ITS OXIDE DURING ANODIZING
IN DISTILLED WATER**

On the example of annealed aluminum at temperatures of 623, 723 and 823 K, different-intensity electroluminescence (EL) of its oxide, formed during high-voltage metal anodization in distilled water, was recorded. It is shown that the change in the crystal structure of the metal during its heat treatment significantly affects the EL kinetics.

Ранее в [1] на примере алюминия (Al) были показаны существенные различия в кинетике электролюминесценции (ЭЛ) его оксида (Al_2O_3) при анодировании отожжённого (823 К) и не отожжённого металла в водных электролитах. А в [2] продемонстрирована возможность замены последних на химически чистую, дистиллированную воду (ДВ) с получением тех же результатов анодирования. В настоящей работе представлены первые результаты исследований кинетики ЭЛ Al_2O_3 , анодно-электролизно формируемого в ДВ на предварительно отожжённом в течение 1 h металле при температурах (Т): 623, 723 и 823 К. Экспериментальная установка полностью соответствовала описанной в [3], как и режим анодирования при 1,2 kV за время (t) 1700 s.

На рис. 1 представлены кинетики изменения плотности тока (J) и светимости ЭЛ (I), формируемого при анодировании в ДВ Al_2O_3 на

поверхности термомодифицированного при отжиге Al и контрольного (не отожжённого). Из рис. 1 чётко прослеживается закономерность изменения $J(t)$ и $I(t)$, особенно для последнего параметра.

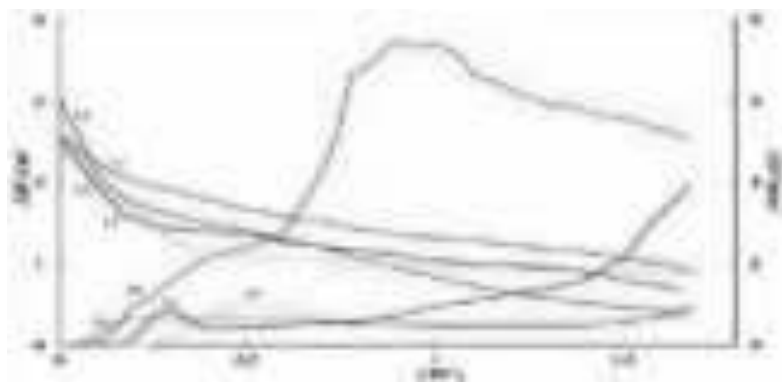


Рис. 1. Кинетические зависимости $J(t)$ – 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 и $I(t)$ – 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 при анодировании в ДВ отожжённого Al: 1.1, 2.1 – контрольный образец; 1.2, 2.2 – при $T = 623$ К; 1.3, 2.3 при $T = 723$ К; 1.4, 2.4 – при $T = 823$ К

Так, при увеличении T отжига металла увеличивается время момента зажигания ЭЛ растущего Al_2O_3 относительно контрольного варианта. Подобная закономерность прослеживается и для пиковой светимости, наибольшая величина которой наблюдается для Al, отожжённого при 623 К. В кинетике $J(t)$ также наблюдается определённая закономерность, особенно в начальный момент анодирования. При отжиге Al в 623 К для него отмечается наибольшая величина $J(t)$, а при 823 К – наименьшая. Однако во всех вариантах виден спад J к концу процесса анодирования, что объясняется образованием плёнки Al_2O_3 , препятствующей токопереносу. Очевидно, что описанные закономерности связаны с изменением кристаллической структуры металла при его отжиге. Таким образом, настоящими исследованиями подтверждена определяющая роль исходной структуры металла в последующем процессе его анодирования и кинетике ЭЛ формирующейся на поверхности Al плёнки Al_2O_3 .

Список литературы

1. Kasalica B., Belča I., Stojadinović S., et al. // J. Phys. Chem. 2007. V. 111. Is. 33. P. 12315-12319.
2. Ovechenko D.S., Boychenko A.P. // Technical Physics Letters. 2019. V. 45. Is. 5. P. 503-506.
3. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2019. Т. 16. № 2. С. 59-67.

А.В. ОСАДЧЕНКО^{1,2,3}, И.А. ЗАХАРЧУК^{1,2}, Д.С. ДАЙБАГЕ^{1,2,3},
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2}, М.Э. ГЕХТ¹,
А.В. РЫЖОВ², Н.В. ПЕВЦОВ², Д.Н. ПЕВЦОВ^{4,5}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский политехнический университет

⁴Московский физико-технический университет

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

⁵Федеральный исследовательский центр проблем химической физики
и медицинской химии РАН, Черноголовка

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ КОМПЛЕКСОВ ЕВРОПИЯ (III) С β-ДИКЕТОНАМИ И КАРБОНОВЫМИ КИСЛОТАМИ

Приведены результаты экспериментов по исследованию оптических свойств новых комплексов европия (III) с β-дикетонами и карбоновыми кислотами. Получены спектры фотолюминесценции и изучена её кинетика, рассчитан квантовый выход люминесценции. Высокая эффективность соединений свидетельствует о возможности создания органических светодиодов на их основе.

A.V. OSADCHENKO^{1,2,3}, I.A. ZAKHARCHUK^{1,2},
D.S. DAIBAGYA^{1,2,3}, A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, S.A. AMBROZEVICH^{1,2},
M.E. GEKHT¹, A.V. RYZHOV², N.V. PEVTSOV², D.N. PEVTSOV^{4,5}

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Moscow Polytechnic University

⁴Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

⁵Federal Research Center of Problems of Chemical Physics
and Medicinal Chemistry of the RAS, Chernogolovka

LUMINESCENCE OF EUROPIUM (III) COMPLEXES WITH β-DIKETONES AND CARBOXYLIC ACIDS

The study of the optical properties of new europium (III) complexes with β-diketones and carboxylic acids is presented. Photoluminescence spectra and decays were obtained, and the luminescence quantum yield was calculated. The high efficiency of the compounds makes them promising for organic light-emitting diodes.

Спрос на высокоэффективные оптоэлектронные устройства значительно возрос в последнее время. Значительный интерес для применения в таких устройствах представляют комплексы

редкоземельных элементов. Они могут применяться в органических светоизлучающих диодах [1], лазерах на красителях [2], в качестве люминесцентных биомаркеров [3].

На рис. 1 и 2 представлены результаты исследований новых комплексов европия (III) с β -дикетонами и карбоновыми кислотами: $\text{Eu}(\text{BTFA})\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COO}$ (1), $\text{Eu}(\text{BTFA})_2\text{CH}_3\text{COO}$ (2), $\text{EuCl}(\text{BTFA})\text{CH}_3\text{COO}$ (3). Спектры люминесценции веществ (рис. 1) полностью соответствуют спектру излучения Eu^{3+} . Обнаружены переходы ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$, ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$. Кинетические зависимости люминесценции (рис. 2) были получены на длине волны 615 нм. Для всех соединений они имеют моноэкспоненциальный вид, времена релаксации: $\tau_1 = 0,31$ мс, $\tau_2 = 0,33$ мс, $\tau_3 = 0,34$ мс. Рассчитанный квантовый выход: $\eta_1 = 70\%$, $\eta_2 = 42\%$, $\eta_3 = 63\%$. Экспериментально показано, что новые соединения европия являются эффективными эмиттерами и могут использоваться в качестве материала эмиссионных слоёв органических светоизлучающих диодов.

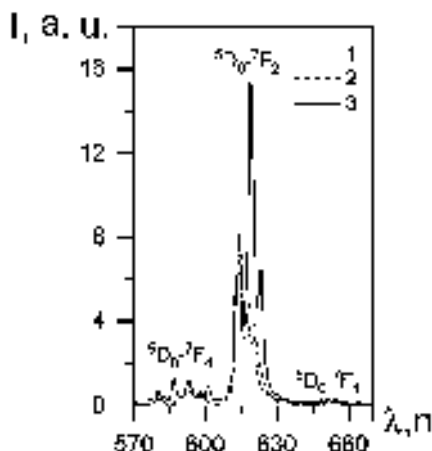


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции

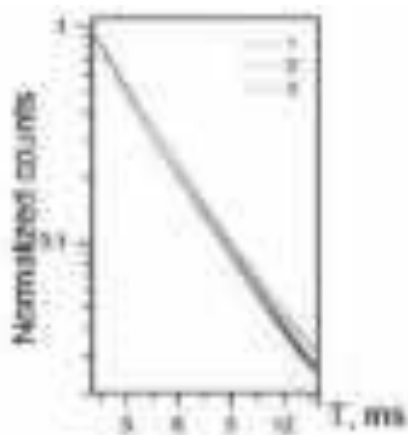


Рис. 2. Кинетические зависимости

Исследование проведено в рамках проекта РФФИ 20-02-00222 А.

Список литературы

1. Law G.L., et al. White OLED with a single-component europium complex // *Inorganic chemistry*. 2009. V. 48. No. 22. P. 10492-10494.
2. Bünzli J.C.G., Piguet C. Taking advantage of luminescent lanthanide ions // *Chemical Society Reviews*. 2005. V. 34. No. 12. P. 1048-1077.
3. Blomberg K., Ulfstedt A.C. Fluorescent europium chelates as target cell markers in the assessment of natural killer cell cytotoxicity // *Journal of immunological methods*. 1993. V. 160. No. 1. P. 27-34.

Н.В. ИЗМАЙЛОВА, Л.Г. САМСОНОВА

Национальный исследовательский Томский государственный университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ
ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛ
С ТЕРМАЛЬНО АКТИВИРОВАННОЙ
ЗАМЕДЛЕННОЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЕЙ В OLED**

Приведены результаты экспериментов по исследованию фотофизических свойств молекул, синтезированных в институте проблем химической физики РАН (г. Черногловка): L1 и L2 в растворах и плёнках, полученных методом термовакuumного осаждения. Были изготовлены OLED ячейки, где в качестве эмиссионного слоя были использованы соединения L1 и L2. Проведён анализ люминесцентных свойств новых соединений в OLED структуре при электровозбуждении. Выполнена оценка значений параметров ячеек OLED.

N.V. IZMAILOVA, L.G. SAMSONOVA

National Research Tomsk State University

**STUDY OF THE LUMINESCENT PROPERTIES OF ORGANIC
MOLECULES WITH THERMALLY ACTIVATED DELAYED
FLUORESCENCE IN OLED**

The results of experiments on studying the photophysical properties of molecules synthesized at the Institute for Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences (Chernogolovka): L1 and L2 in solutions and films obtained by thermal vacuum deposition are presented. OLED cells were fabricated, where L1 and L2 connections were used as the emission layer. An analysis of the luminescent properties of new compounds in the OLED structure under electrical excitation has been carried out. The values of the parameters of the OLED cells have been evaluated.

В органических светоизлучающих диодах (OLED) можно использовать фосфоресцентные [1] и флуоресцентные материалы, различающиеся принципом светоизлучения. В случае флуоресцентных материалов рекомбинация, сопровождающаяся излучением света, происходит только при переходе синглетного экситона в основное состояние. В фосфоресцентных материалах излучение происходит при переходе молекулы в основное состояние из триплетного состояния.

Фосфоры представляют собой органо-металлические комплексы на основе благородных металлов, таких как иридий, платина и слишком

дороги для массового изготовления устройств на их основе. В последние годы предложено использовать в светоизлучающих устройствах органические молекулы, в которых происходит заимствование возбуждения из триплетного канала [2]. Процесс заимствования осуществляется в тех молекулах, в которых триплетные уровни располагаются достаточно близко к S1 уровню. Энергетическая щель между S1 и T1 состояниями у таких молекул $\sim 1000 \text{ см}^{-1}$ [3], и преодоление этого энергетического барьера осуществляется за счёт термической активации. Такое излучение носит название термически активированной замедленной флуоресценцией (ТАЗФ). Материалы с ТАЗФ при их использовании в OLED способны обеспечить высокую внешнюю квантовую эффективность, а за счёт своей стабильности, увеличение срока службы OLED устройства. Это обуславливает большое внимание к таким материалам.

Объектами исследования в работе являлись соединения синтезированные в институте проблем химической физики РАН (г. Черноголовка): 2,8-бис[N,N-ди(4-метоксифенил)амино]дибензотиофен-S,S-диоксид (шифр L1); 2-N,2-N,8-N-тетраakis(4-метоксифенил) - (дибензотиофен-5,5-диоксид)-2,8-диамин (шифр L2).

Спектры возбуждения и флуоресценции органических соединений при фотовозбуждении исследованы в растворах хлороформа, этанола и плёнках, полученных термовакuumным осаждением (ТВО) на стеклянных подложках. Для оценки величины энергетической щели $\Delta S_1 - T_1$, проводилось измерение максимумов фотолюминесценции и фосфоресценции соединений в плёнках ТВО при температуре 77 К.

Образцы OLED для исследования электролюминесцентных свойств готовились одинаковые по структуре, но с различными эмиссионными слоями (L1 и L2): ITO/PEDOT:PSS/NPD/L1/BSP/LiF/Al (ячейка I) и ITO/PEDOT:PSS/NPD/L2/BSP/LiF/Al (ячейка II). Регистрация вольт-амперных зависимостей проводилась внутри бокса, поддерживающего инертную атмосферу азота. Приёмные устройства соответствующих регистрирующих приборов находились внутри бокса. Сами приборы были расположены вне бокса на измерительном стенде сбора и обработки информации.

Список литературы

1. Tian X., Sun H., Zhang Q., Adachi C. // Chin. Chem. Lett. 2016. V. 27. P. 1445-1452.
2. Segal M., et al. // Phys. Rev. B. 2003. V. 7. P. 338-344.
3. Liu Y., et al. // Nature Reviews Materials. 2018. V. 3. Art. № 18020.

С.Н. ЛЕТУТА, А.Т. ИШЕМГУЛОВ
Оренбургский государственный университет

КИНЕТИКА ТРИПЛЕТ-ТРИПЛЕТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ МОЛЕКУЛ ПРИ ДВУХКВАНТОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Изучена кинетика триплет-триплетного поглощения многоатомных молекул (на примере галогензамещённых флуоресцеина – эозина и эритрозина) при ступенчатом заселении их высоких триплетных уровней с помощью двух моноимпульсных лазеров с регулируемой задержкой между импульсами. Показано, что с помощью кинетики наведённого поглощения можно оценить эффективность конкурирующих каналов релаксации высоковозбуждённых триплетных состояний.

S.N. LETUTA, A.T. ISHEMGULOV
Orenburg State University

KINETICS OF TRIPLET-TRIPLET ABSORPTION OF MOLECULES UNDER TWO-QUANTUM EXCITATION

The kinetics of triplet-triplet absorption of polyatomic molecules (by the example of halogen-substituted fluorescein, eosin and erythrosin) was studied upon stepwise population of their high triplet levels using two single-pulse lasers with an adjustable delay between pulses. It is shown that induced absorption kinetics can be used to evaluate the efficiency of competing relaxation channels for highly excited triplet states.

В настоящей работе представлены результаты исследования релаксации высоких триплетных T_m состояний молекул красителей (эозин, эритрозин), заселяемых путём двухквантового ступенчатого возбуждения через нижнее T_1 состояние по схеме $S_0 \rightarrow S_1$, $T_1 \rightarrow T_m$ под действием двух лазерных импульсов с соответствующими частотами. Один импульс генерировался твердотельным YAG-лазером (532 нм), другой – жидкостным лазером на красителях (~ 590 нм). Изменение населённости возбуждённых триплетных уровней красителей оценивалась путём измерения интенсивности пропускания зондирующего луча He-Ne лазера растворами красителей в кварцевой кювете толщиной 1 мм или окрашенными полимерными плёнками толщиной 50 мкм.

Релаксация высоких триплетных состояний возможна по одному из следующих каналов: безызлучательная внутренняя конверсия (или излучение) $T_m \rightarrow T_1$; обратная $T_m \rightarrow S_1$ ИКК; либо перенос энергии на

молекулы окружения (фотохимическая реакция). Если какой-либо процесс конкурирует с внутренней конверсией $T_m \leftrightarrow T_1$, то после окончания возбуждающего импульса (лазера на красителях) в плавной кинетической кривой затухания наведённого поглощения должна появляться характерная ступень [1], указывающая на уменьшение концентрации молекул, оставшихся в триплетном T_1 состоянии (рис. 1).

На рис. 2 представлены экспериментальные фрагменты кинетических кривых затухания наведённого поглощения эритрозина в ПВХ при одно- (нижняя кривая) и двухквантовом (средняя кривая) возбуждении. При плотности мощности лазера на красителях 5 МВт/см^2 уменьшение оптической плотности наведённого поглощения после окончания импульса составляет около 40 %. Исследование кинетики и спектров наведённого поглощения в диапазоне 300 - 700 нм указывает на отсутствие возможных фотохимических реакций. Эффективность переноса энергии в средах с полностью насыщенными связями не превышает 10^{-3} [2, 3]. Отсутствие необратимых фотохимических превращений и безызлучательного переноса энергии дают основание связать уменьшение концентрации молекул красителей в триплетном состоянии с эффективной обратной $T_m \rightarrow S_1$ ИКК и последующей $S_1 \rightarrow S_0$ флуоресценцией. В работе приведена оценка квантового выхода обратной ИКК для исследованных образцов красителей.

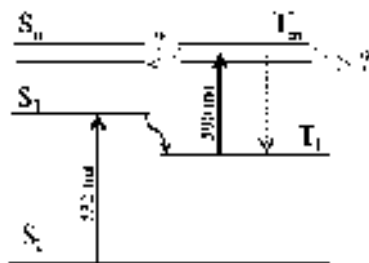


Рис. 1. Схема электронных состояний молекул

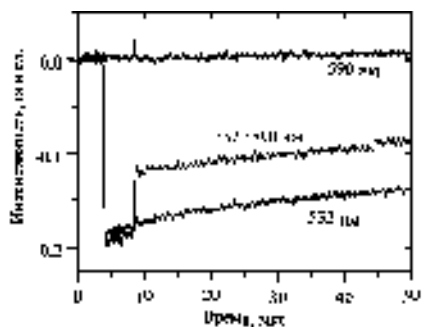


Рис. 2. Кинетика пропускания зондирующего луча через образец

Список литературы

1. Летуа С.Н. и др. // Квантовая электроника. 2022. Т. 52. № 9. С. 823-826.
2. Герко В.И. и др. // Оптика и спектроскопия. 1971. Т. 30 (3). С. 456-460.
3. Steer R.P., et al. // Canadian J. Chem. 2017. V. 95 (10).

Д.В. ЧЕРНОВ, А.П. БОЙЧЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
АНОДИРОВАНИЕМ МЕТАЛЛОВ
ПО ИХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

Описан принцип программно-аппаратного управления анодированием металлов по их электролюминесценции. Приведена возможная электрическая схема его реализации.

D.V. CHERNOV, A.P. BOYCHENKO
Kuban State University, Krasnodar

**HARDWARE-SOFTWARE CONTROL OF ANODIZING
METALS BY THEIR ELECTROLUMINESCENCE**

The principle of hardware-software control of metal anodizing by their electroluminescence is described. A possible electrical circuit of its implementation is given.

В работе [1] на примере алюминия (Al) была впервые показана возможность анодно-электролизного формирования оксида металла по генерируемой им электролюминесценции (ЭЛ). Эта задача осуществлена путём механической регулировки шаговым двигателем потенциометра источника напряжения под «контролем» заданного уровня яркости ЭЛ. Однако такой подход имеет очень большую инерционность в установлении необходимого напряжения анодирования и поэтому даёт большую погрешность, что видно, например, по колебаниям яркости ЭЛ, приведённой на рисунке работы [1]. Для устранения описанного недостатка нами предложено заменить механический потенциометр в стабилизаторе тока – гальваностате (ГС) на электронно-цифровой (ЭЦП), который может управляться программируемым микроконтроллером (МК) через интерфейс SPI. В качестве МК использовалась плата Arduino Nano, на базе которой разработан пульт управления (ПУ) ЭЦП и ГС в целом. Для гальванической развязки ПУ от высокопотенциальных узлов ГС применён DC\DC преобразователь B0505S-1WR3 и четырёхканальный цифровой изолятор ADUM1411ARWZ-RL, обеспечивающий передачу данных на ЭПЦ. Кроме того, для заданной длительности процесса анодирования с помощью ГС предусмотрено оптоэлектронное реле

К.Н. БАРАНОВ, С.П. КАРАМЫШЕВА, А.О. ОРЛОВА,
И.А. РЕЗНИК

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК AgInS_2 , СФОРМИРОВАННЫХ В МИКРОФЛЮИДНОМ ЧИПЕ

Продемонстрирована возможность синтеза квантовых точек AgInS_2 в микрофлюидном чипе, сформированном при помощи аддитивных методов производства. Показана зависимость оптических свойств синтезируемого наноструктурированного материала от температуры синтеза. Посчитан и сопоставлен квантовый выход люминесценции квантовых точек AgInS_2 , синтезированных в колбе и в микрофлюидном чипе. Выявлен больший оптический отклик у квантовых точек, синтезированных при большей температуре. Выяснено, что равномерное перемешивание и скорость прохождения прекурсорами через реактор микрофлюидного чипа оказывают значительное влияние на оптические свойства структур.

K.N. BARANOV, S.P. KARAMYSHEVA, A.O. ORLOVA,
I.A. REZNIK

ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH OF THE OPTICAL PROPERTIES OF AgInS_2 QUANTUM DOTS FORMED IN A MICROFLUID CHIP

The possibility of synthesizing AgInS_2 quantum dots in a microfluidic chip formed using additive manufacturing methods is demonstrated. The dependence of the optical properties of the synthesized nanostructured material on the synthesis temperature is shown. The luminescence quantum yield of AgInS_2 quantum dots synthesized in a flask and in a microfluidic chip was calculated and compared. A greater optical response was found for quantum dots synthesized at a higher temperature. It was found that uniform mixing and the rate of passage of precursors through the microfluidic chip reactor have a significant effect on the optical properties of the structures.

Для производства лекарств на первоначальном этапе необходимо проводить синтезы частиц, обладающих антибактериальными свойствами. Зачастую повторение классического синтеза частиц в колбе приводит к нестабильным результатам, что может повлиять на ухудшение реализуемых свойств и на ограничение использования таких структур в промышленности [1]. Оксидативный стресс бактерий может быть вызван

активными формами кислорода, взаимодействуя с которыми бактерии гибнут. В последнее время для исследования антибактериальных свойств гибридных структур, благодаря своим свойствам, часто используют квантовые точки (КТ) AgInS_2 (AIS) как в роли сенсibilизатора, так и в роли катализатора.

Микрофлюидный синтез КТ может позволить точно и стабильно контролировать оптические и фотофизические свойства сформированных структур, что сделает возможным использование такой методики формирования частиц в промышленных масштабах [2]. Кроме того, использование аддитивных методов производства и прототипирования поможет упростить формирование микрофлюидных чипов, уменьшить затраты на используемые материалы и значительно сэкономить время на ввод в эксплуатацию конечного продукта [3].

Синтез водных квантовых точек (КТ) AgInS_2 (AIS) в микрофлюидном чипе и колбе происходил по следующей методике [4]. После смешивания реагенты с помощью программируемых шприцевых насосов проходили через реактор микрофлюидного чипа, сформированного на 3D-принтере ANYCUBIC Photon Mono из термостойкого фотополимера Phrozen TR250-LV.

В результате проделанных синтезов все образцы КТ характеризовались эффективным поглощением в области $\lambda < 450$ нм и широкополосной люминесценцией от 500 до 800 нм. Квантовый выход люминесценции (КВЛ) образцов, синтезированных в микрофлюидном чипе при температуре 40, 60 и 90 °C составил 0,9, 1,83 и 3,66 % соответственно. Квантовый выход люминесценции образцов, синтезированных микрофлюидным методом в течение 28 и 280 с оказался в 2,5 раза выше, чем синтезированных в колбе. Полученный результат указывает на эффективность перемешивания прекурсоров в микрофлюидном чипе и его преимущество перед классическим методом синтеза в колбе.

Исследование было выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, госзадание № 2019-1080, и гранта НИР МиА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Abedini-Nassab R., et al. // *Micromachines*. 2021. V. 12. P. 1-34.
2. Tofighi G. et al // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2019. V. 192. P. 48-56.
3. Lee J.-Y., et al. // *Applied Materials Today*. 2017. V. 7. P. 120-133.
4. Raevskaya A., et al. // *The Journal of Physical Chemistry C*. 2017. V. 121. P. 9032-9042.

Т.О. ОСКОЛКОВА¹, А.А. МАТЮШКИНА¹, Ф.А. СЕВИД^{1,2},
А.О. ОРЛОВА¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Университет Мансура, Эль-Мансура, Египет

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК AgInS₂/ZnS И МОЛЕКУЛ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА

В работе предложен новый метод формирования биосовместимых наноконпозитов на основе полимерной матрицы из хитозана, гидрофобных молекул тетрафенилпорфирина и гидрофильных квантовых точек AgInS₂/ZnS. Приведены результаты исследования оптических свойств разработанных систем, включая стационарную и время-разрешённую люминесценцию и спектроскопию магнитного кругового дихроизма.

T.O. OSKOLKOVA¹, A.A. MATIUSHKINA¹, F.A. SEWID^{1,2},
A.O. ORLOVA¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Mansoura University, Mansoura, Egypt

OPTICAL PROPERTIES OF POLYMER NANOCOMPOSITES BASED ON AgInS₂/ZnS QUANTUM DOTS AND PHOTOSENSITIZER MOLECULES

In this study the new method of formation of biocompatible nanocomposites based on a chitosan polymer matrix, hydrophobic tetraphenylporphyrin molecules, and hydrophilic AgInS₂/ZnS quantum dots is proposed. The results of the investigation of optical properties of the created systems, including steady-state and time-resolved luminescence and magnetic circular dichroism spectroscopy, are presented.

Одним из современных подходов в разработке новейших терапевтических агентов является создание гибридных структур на основе традиционных фотосенсибилизаторов и наноструктурированных материалов, в частности, квантовых точек (КТ) – полупроводниковых нанокристаллов, в которых движение носителей заряда ограничено во всех трёх пространственных измерениях [1]. Обладая уникальными размерно-зависимыми фотофизическими свойствами и высоким квантовым выходом люминесценции, КТ могут выступать в качестве потенциальных доноров энергии для молекул фотосенсибилизаторов в

составе гибридной структуры [2], тем самым обеспечивая значительное улучшение фотодинамического эффекта терапии [3].

В рамках данной работы были сформированы наноконпозиты на основе полимерной матрицы из хитозана (CS), молекул фотосенсибилизатора тетрафенилпорфирина (TPP) и КТ тройного состава $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ (AIS), отличающихся низкой токсичностью и хорошей биосовместимостью [4].

Для качественного анализа были исследованы стационарные спектры электронного поглощения и люминесценции как двухкомпонентных наноконпозитов CS-AIS-TPP, так и однокомпонентных наноконпозитов CS-AIS и CS-TPP. Кроме того, для более подробного описания взаимодействий между КТ и молекулами TPP, а также выявления процентного содержания агрегатов TPP в составе наноконпозитов, использовался метод спектроскопии магнитного кругового дихроизма. Анализ стационарных спектров люминесценции показал, что в процессе увеличения концентрации TPP в составе наноконпозита наблюдается уменьшение интегральной интенсивности люминесценции КТ, кроме того, в спектральной области на 600 - 800 нм наблюдается характерное увеличение вклада люминесценции молекул TPP.

Кинетика люминесценции образцов исследовалась с помощью времязрешённой люминесцентной микроскопии. Продемонстрировано, что увеличение концентрации молекул TPP в составе наноконпозита сопровождается уменьшением среднего характерного времени затухания люминесценции наноконпозита с 239 до 115 нс. Кроме того, в рамках мультиэкспоненциальной модели затухания люминесценции наноконпозитов наблюдается появление дополнительной четвёртой компоненты, связанной с люминесценцией TPP.

Таким образом, предполагается, что полученные результаты могут свидетельствовать о реализации переноса энергии электронного возбуждения между КТ и молекулами TPP в составе наноконпозита. В продолжение данной работы будет разработана модель, описывающая механизм переноса энергии в составе данных наноструктур.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках ГЗ 2019-1080 и гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Martynenko I.V., et al. // Journal of Materials Chemistry B. 2017. V. 5 (33). P. 6701-6727.
2. Dos Santos, et al. // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2020. V. 125. P. 115819.
3. Liu B., et al. // Journal of Luminescence. 2019. V. 209. P. 61-68.
4. Kurshanov D.A., et al. // Optics and Spectroscopy. 2018. V. 125 (6). P. 1041-1046.

С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, А.С. САРАТОВСКИЙ^{2,4}, Д.В. БУЛЫГА¹,
В.Л. СТОЛЯРОВА^{4,5}, Н.Б. КНЯЗЯН⁶

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

³Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

⁴Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург

⁵Санкт-Петербургский государственный университет

⁶Институт общей и неорганической химии НАН Армении, Ереван

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ MgO-Al₂O₃-ZrO₂-SiO₂:Mn²⁺ МАТЕРИАЛЫ

В работе золь-гель методом синтезированы Mn²⁺-содержащие MgO-Al₂O₃-ZrO₂-SiO₂ материалы и исследованы их структура, морфология, химический состав и люминесцентные свойства. Для изучения материалов были использованы методы рентгенофазового, электронно-микроскопического, энергодисперсионного анализов и люминесцентной спектроскопии. Показана возможность внедрения ионов Mn²⁺ в кристаллическую решётку различных оксидных кристаллов в процессе кристаллизации материалов. Полученные материалы перспективны в качестве люминесцентных конверторов УФ-излучения.

S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, A.S. SARATOVSKII^{2,4}, D.V. BULYGA¹,
V.L. STOLYAROVA^{4,5}, N.B. KNYAZYAN⁶

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

³S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

⁴Grebenschikov Institute of Silicate Chemistry, Saint-Petersburg

⁵Saint-Petersburg State University

⁶Institute of General and Inorganic Chemistry
of National Armenian Academia of Science, Yerevan

LUMINESCENT SOL-GEL MgO-Al₂O₃-ZrO₂-SiO₂:Mn²⁺ MATERIALS

In this work, Mn²⁺-containing MgO-Al₂O₃-ZrO₂-SiO₂ materials were synthesized by the sol-gel method and their structure, morphology, chemical composition, and luminescent properties were studied. To study the materials, the methods of X-ray phase, electron microscopic, energy dispersive analyzes and luminescent spectroscopy. The possibility of introducing Mn²⁺ ions into the crystal lattice of various oxide crystals during the crystallization of materials is shown. The obtained materials are promising as luminescent converters of UV radiation.

Известно [1, 2], что различные Mn^{2+} -содержащие стеклокристаллические материалы перспективны для применения в качестве люминесцентных конвертеров излучения в светодиодах. Стеклокристаллические материалы системы $MgO-Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$ обладают высокой термостабильностью и химической устойчивостью и широко используются в различных оптических приложениях [3, 4].

Целью настоящей работы являлся синтез и исследование свойств Mn^{2+} -содержащих $MgO-Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$ материалов. Эти материалы были синтезированы золь-гель методом из водных растворов солей металлов, пропанола-2 и тетраэтоксисилана. Структура, морфология и люминесцентные свойства материалов были исследованы методами рентгенофазового и электронно-микроскопического анализов и люминесцентной спектроскопии.

Показано, что применение золь-гель метода обеспечивает высокую однородность химического состава по объёму синтезированных материалов. Установлено, что добавки соединений марганца ускоряют процессы кристаллизации гелей системы $MgO-Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2$. При кристаллизации гелей происходило формирование различных оксидных кристаллов: твёрдых растворов β -кварца, кордиерита, ZrO_2 и других. В спектрах люминесценции материалов наблюдаются несколько полос эмиссии, расположенные в синей и красной частях спектра, что может быть связано с вхождением Mn^{2+} в структуру различных кристаллов, сформировавшихся в процессе термообработки гелей.

В результате выполненных исследований показано, что полученные материалы могут быть перспективны в качестве люминесцентных даун-конвертеров излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и КН РА (проект № 20-53-05013).

Список литературы

1. Fang Z., Peng W., et al. // J. Europ. Ceram. Soc. 2020. V. 40. No. 4. P. 1658-1664.
2. Zhuang Y., Ueda J., et al. // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 105. P. 191904.
3. Bortkevich A.V., Dymshits O.S., et al. // J. Opt. Technol. 2002. V. 69 (8). P. 558-594.
4. Evstropiev S.K., Yurchenko D.A., et al. // Ceramics International. 2022. V. 48 (17) P. 24517-24522.

М.Д. САННИКОВА, Д.В. МАРАСАНОВ, Е.М. СГИБНЕВ,
Е.В. КУЛЬПИНА, Л.Ю. МИРОНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МЕХАНИЗМ ТУШЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В СИЛИКАТНОМ СТЕКЛЕ

В работе исследуются особенности люминесценции кластеров серебра в силикатном стекле и механизм тушения люминесценции. Спектр люминесценции кластеров состоит из флуоресценции и фосфоресценции, время жизни которых слабо зависит от концентрации кластеров серебра в стекле. Показано, что соотношение между компонентами люминесценции изменяется в зависимости от температуры образца. Были исследованы спектры люминесценции кластеров серебра в диапазоне от 93 до 473 К, рассчитана температурная чувствительность образцов.

M.D. SANNIKOVA, D.V. MARASANOV, Yu.M. SGIBNEV,
E.V. KULPINA, L.Yu. MIRONOV
ITMO University, Saint-Petersburg

THE QUENCHING MECHANISM OF LUMINESCENCE OF SILVER CLUSTERS IN SILICATE GLASS

The luminescence features of silver clusters in silicate glass and the quenching mechanism of luminescence are studied. The clusters luminescence spectrum consists of fluorescence and phosphorescence, the luminescence components lifetime weakly depends on the silver clusters concentration in the. The glass ratio between components changes depending on the sample temperature. The clusters luminescence spectra were measured in the temperature range from 93 to 473 K, the samples temperature sensitivity was calculated.

В настоящее время разработка новых люминесцентных материалов для различных применений представляет большой интерес. К перспективным материалам относятся светоизлучающие среды на основе кластеров серебра за счёт их широкополосной и эффективной люминесценции. Спектр люминесценции серебряных кластеров содержит в себе две компоненты: флуоресценцию и фосфоресценцию [1]. Отличительной особенностью компонент люминесценции является разный характер температурной зависимости [2]. Исследование температурного тушения люминесценции позволяет определить механизм безызлучательных

переходов в кластерах, что является важной задачей для разработки новых люминесцентных материалов.

Для проведения исследований было синтезировано стекло состава $15\text{Na}_2\text{O}-5\text{ZnO}-3\text{Al}_2\text{O}_3-70.5\text{SiO}_2-6.5\text{F}$ с примесью $0,002$ мол% Sb_2O_3 . Путём низкотемпературного ионного обмена с последующей термообработкой в стекле были сформированы кластеры серебра. Было проведено исследование спектров люминесценции кластеров в диапазоне $400 - 700$ нм при возбуждении излучением с длиной волны 340 нм. Среднее время жизни компонент флуоресценции и фосфоресценции от $1,63$ до $2,99$ нс и 100 мкс, соответственно. Было обнаружено, что влияние температуры образцов на люминесценцию кластеров спектрально неоднородно, что проявляется в изменении формы спектра при различных температурах (рис. 1). При изменении температуры от 93 до 473 К наблюдается монотонное уменьшение интенсивности флуоресценции, при этом изменение интенсивности фосфоресценции немонотонно (рис. 2). Относительная температурная чувствительность кластеров серебра в диапазоне от 93 до 473 К достигает $2,19\%$ для исследуемых образцов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-73-10055.

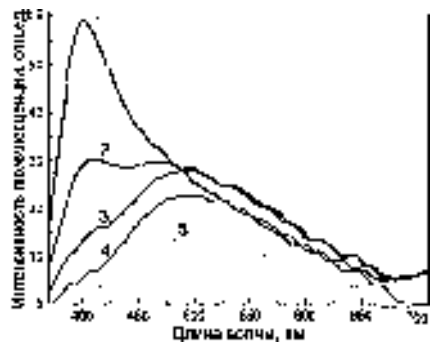


Рис. 1. Спектры люминесценции при температурах 93 (1), 193 (2), 273 (3), 353 (4) и 473 К (5)

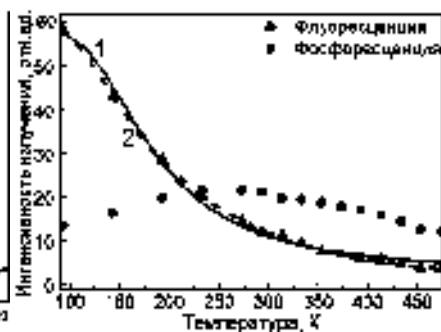


Рис. 2. Максимумы интенсивности флуоресценции и фосфоресценции при различных температурах; 1 и 2 – аппроксимационные кривые флуоресценции

Список литературы

1. Marasanov D.V., Mironov L.Yu., et. al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. V. 22. No. 40. P. 23342-23350.
2. Mironov L.Yu., Marasanov D.V., et. al. // J. Phys. Chem. C. 2022. V. 126. No. 32. P. 13863-13869.

Д.В. МАРАСАНОВ, М.Д. САННИКОВА, Е.В. КУЛЬПИНА,
Е.М. СГИБНЕВ, Л.Ю. МИРОНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ВЛИЯНИЕ ИОНОВ СУРЬМЫ
НА СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА
КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В ИОНООБМЕННОМ СЛОЕ
НАТРИЕВОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА**

В работе приведены исследования спектрально-люминесцентных свойств кластеров серебра в зависимости от концентрации сурьмы в натриевосиликатном стекле. В спектре люминесценции присутствуют наносекундная и микросекундная компоненты излучения кластеров серебра. Варьирование концентрации сурьмы в стекле позволяет изменять размер формирующихся кластеров и исследовать зависимость процессов люминесценции от среднего размера кластеров.

D. V. MARASANOV, M. D. SANNIKOVA, E. V. KULPINA,
Yu. M. SGIBNEV, L. Yu. MIRONOV
ITMO University, Saint-Petersburg

**INFLUENCE OF ANTIMONY IONS ON THE SPECTRAL
AND LUMINESCENT PROPERTIES OF SILVER CLUSTERS
IN ION-EXCHANGED LAYERS OF SODIUM SILICATE GLASS**

The paper presents study of the spectral-luminescent properties of silver clusters depending on the concentration of antimony ions in silica-based glass. Cluster luminescence spectra consist of microsecond and nanosecond emission components. Research has shown the effect of antimony ions on the spectral-luminescent properties of silver clusters.

На сегодняшний день в оптике широко используются натриевосиликатные стёкла, которые можно активировать различными ионами, в том числе серебром. Известно, что введение большой концентрации серебра в натриевосиликатное стекло возможно методом низкотемпературного ионного обмена [1]. Для формирования кластеров серебра применяются различные восстановители ионов серебра, например, ионы сурьмы [2]. Важной особенностью люминесценции кластеров серебра в стекле, является наличие наносекундной и микросекундной компонент [3]. Ранее не проводилось подробных исследований о влиянии концентрации ионов сурьмы на флуоресценцию и

флуоресценцию кластеров серебра. Целью работы является исследование спектрально-люминесцентных свойств серебряных кластеров в ионообменном слое силикатного стекла в зависимости от концентрации сурьмы.

В работе были использованы натриевосиликатные стёкла на основе $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-F}$ системы, активированной оксидом сурьмы (0,002 - 0,01 мол.%). В стекле были синтезированы кластеры серебра методом ионного обмена (ИО) с последующей термической обработкой при температуре 400 °С в течение 15 ч. На каждом этапе измерялись спектры поглощения и люминесценции образцов при длине волны возбуждения 370 нм.

Было показано, что квантовый выход люминесценции кластеров увеличивается с ростом концентрации сурьмы от 0.14 до 0.27. Также выявлен сдвиг максимума полосы люминесценции кластеров серебра с 580 до 600 нм. Сдвиг спектра люминесценции обусловлен сдвигами спектров флуоресценции (рис. 1) и фосфоресценции (рис. 2) кластеров. По всей видимости причиной наблюдаемых сдвигов является формирование более крупных люминесцирующих кластеров с увеличением концентрации восстановителей ионов серебра в стекле.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-73-10055.

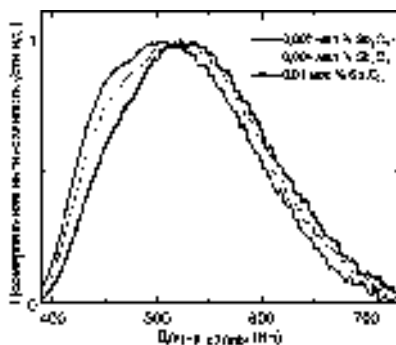


Рис. 1. Спектры флуоресценции образцов. $\lambda_{\text{возб}} = 370$ нм

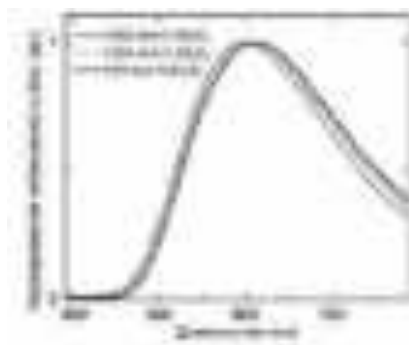


Рис. 2. Спектры фосфоресценции образцов. $\lambda_{\text{возб}} = 370$ нм

Список литературы

1. Sgibnev Yu.M., Nikonov N.V., et al. // Appl. Sci. 2021. V. 11. P. 3891.
2. Marasanov D.V., Mironov L.Yu., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2020. V. 22 (40). P. 23342-23350.
3. Soriano-Romero O., Flores-Cruz R.L., et al. // J. Lumin. 2020. V. 222. P. 1-9.

А.А. СЛОБОЖАНИНОВ, Д.В. МАРАСАНОВ,
Е.В. КУЛЬПИНА, М.Д. САННИКОВА, Р.Д. ХАРИСОВА,
Е.М. СГИБНЕВ, Л.Ю. МИРОНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОДЕГРАДАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КЛАСТЕРОВ СЕРЕБРА В СТЕКЛЕ

Приведены результаты исследования фотодеградации люминесценции кластеров серебра в стекле. Исследовано влияние повторной термообработки облучённого стекла на интенсивность люминесценции кластеров.

A.A. SLOBOZHANINOV, D.V. MARASANOV,
E.V. KULPINA, M.D. SANNIKOVA, R.D. KHARISOVA,
Yu.M. SGIBNEV, L.Yu. MIRONOV
ITMO University, Saint Petersburg

RESEARCH OF PHOTOBLEACHING OF SILVER CLUSTERS IN SILICA-BASED GLASS

The study presents results of photobleaching research of silver clusters in silica-based glass. The effect of secondary heat treatment of irradiated glass on the luminescence intensity has been studied.

Целью работы является исследование фотодеградации люминесценции стёкол, активированных кластерами серебра, под действием ультрафиолетового облучения и влияния повторной термообработки на интенсивность люминесценции кластеров. В качестве среды для формирования кластеров серебра была использована матрица фототерморефрактивного стекла с составом $15\text{Na}_2\text{O}-5\text{ZnO}-3\text{Al}_2\text{O}_3-70.5\text{SiO}_2-6.5\text{F}$, активированная ионами серебра [0]. Ионы серебра были введены в стекло с помощью низкотемпературного ионного обмена Na^+-Ag^+ в расплаве $95\text{NaNO}_3/5\text{AgNO}_3$ (мол.%) при температуре $320\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 15 мин. Для роста кластеров серебра стекло после ионного обмена было термообработано при температуре $450\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 24 ч. Для облучения образца был использован светодиод с максимальной длиной волны излучения 365 нм, плотность мощности составила 200 мВ/см^2 .

В ходе работы была исследована кинетика фотодеградации люминесценции кластеров серебра (рис. 1). Полученные данные были аппроксимированы суммой двух экспоненциальных функций. Для каждого из процессов фотодеградации был рассчитан квантовый выход ($\Phi_{b1} = 8,2 \cdot 10^{-3}$, $\Phi_{b2} = 4,1 \cdot 10^{-4}$). Предполагается, что фотодеградация кластеров серебра является результатом фотоиндуцированного переноса электрона. Повторная термообработка образцов после облучения при температурах ниже 350°C не привела к значительным изменениям люминесценции. При увеличении температуры повторной термообработки от 350 до 450°C наблюдается частичное восстановление интенсивности люминесценции (рис. 2). Таким образом, фотодеградация люминесценции кластеров обратима. Наиболее значимое восстановление происходит в первые 60 мин. термообработки, спустя данный промежуток времени изменение люминесценции минимально.

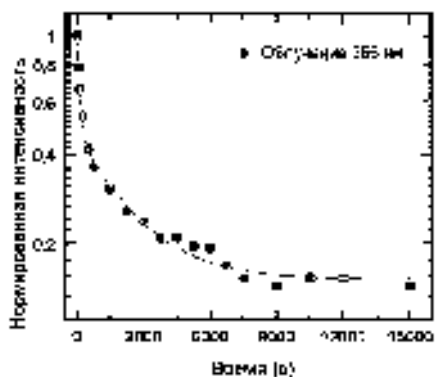


Рис. 1. Кинетика фотодеградации люминесценции кластеров серебра

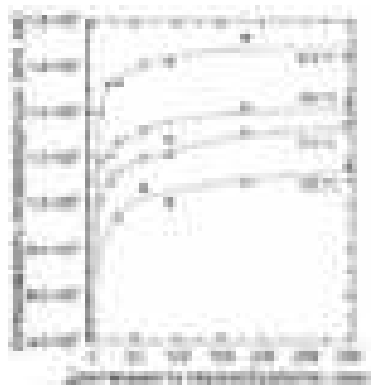


Рис. 2. Кинетика восстановления люминесценции кластеров серебра после термообработки

Список литературы

1. Marasanov D.V., et al. Luminescence and energy transfer mechanisms in photo-thermo-refractive glasses co-doped with silver molecular clusters and Eu^{3+} // Physical Chemistry Chemical Physics. 2020. V. 22. No. 40. P. 23342-23350.
2. Mironov L.Yu., et al. The Role of thermally activated quenching and energy migration in luminescence of silver clusters in glasses // The Journal of Physical Chemistry C. 2022. V. 126. No. 32. P. 13863-13869.

С.В. ГУЩИН, С.В. КУЗНЕЦОВ¹, А.А. ЛЯПИН,
В.Ю. ПРОЙДАКОВА¹, П.А. РЯБОЧКИНА, П.П. ФЕДОРОВ¹
*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, Саранск*
¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ЛЮМИНОФОРОВ SrF₂:Ho ЗА СЧЁТ СОЛЕГИРОВАНИЯ ИОНАМИ Yb³⁺ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ДВУХМИКРОННЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Исследована ап-конверсионная люминесценция фторидных люминофоров SrF₂:Ho и SrF₂:Ho,Yb синтезированных методом соосаждения из водных растворов. При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 нм люминофоры SrF₂:Ho и SrF₂:Ho,Yb обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Исследована зависимость интенсивности ап-конверсионной люминесценции от концентрации редкоземельных ионов и определены значения энергетического выхода ап-конверсионной люминесценции для спектрального диапазона 380 - 1100 нм. Рассчитаны значения координат цветностей и коррелированных цветовых температур ап-конверсионной люминесценции фторидных люминофоров.

S.V. GUSHCHIN, S.V. KUZNETSOV¹, A.A. LYAPIN,
V.Yu. PROYDAKOVA¹, P.A. RYABOCHKINA, P.P. FEDOROV¹
¹*National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk*
²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

ENHANCEMENT OF UP-CONVERSION LUMINESCENCE OF SrF₂:Ho PHOSPHORS USING CO-DOPING Yb³⁺ IONS UPON EXCITATION OF TWO MICRON LASER RADIATION

In this work, we investigated upconversion luminescence (UCL) fluoride phosphors. Fluorite-type SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb phosphors were synthesized by using a coprecipitation from an aqueous nitrate solution technique. SrF₂:Ho and SrF₂:Ho,Yb phosphors possess intense UCL in the visible and near-infrared region of the spectrum upon excitation laser radiation with wavelength 1940 nm. We have studied the intensity UCL dependent on rare-earth concentration. Also, we estimated UCL energy yield in the 380 - 1100 nm spectral range. Values of chromaticity coordinates and correlated color temperatures of UCL of fluoride phosphors were calculated.

За последние несколько лет, ап-конверсионные люминофоры, легированные редкоземельными ионами были основным объектом исследования многих научных групп, для их применения в лазерной физике, биомедицине, солнечной энергетике, оптогенетике, криминалистике и других [1 - 7].

В настоящей работе объектами исследования являлась концентрационные серии фторидных люминофоров со структурой флюорита $\text{SrF}_2:\text{Ho}$ и $\text{SrF}_2:\text{Ho},\text{Yb}$ синтезированные методом соосаждения из водных растворов. На рис. 1а представлен спектр отражения ионов Ho^{3+} и Yb^{3+} в диапазоне 300 - 2100 нм, полученные для люминофора $\text{SrF}_2:\text{Ho}(3.9\%),\text{Yb}(2.0\%)$. При возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 нм люминофоры $\text{SrF}_2:\text{Ho}$ и $\text{SrF}_2:\text{Ho},\text{Yb}$ обладают интенсивной ап-конверсионной люминесценцией (рис. 1b).

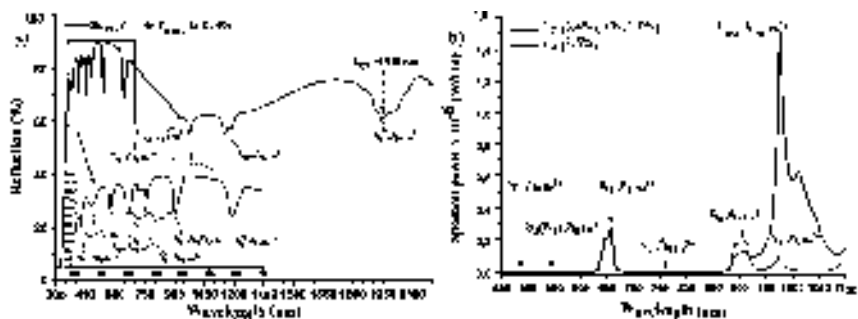


Рис. 1. Спектр отражения ионов Ho^{3+} и Yb^{3+} (a); спектры ап-конверсионной люминесценции люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Ho}$ и $\text{SrF}_2:\text{Ho},\text{Yb}$ при возбуждении лазерным излучением с длиной волны 1940 нм (b)

Исследование показало, что солегирование люминофоров $\text{SrF}_2:\text{Ho}$ ионами Yb^{3+} позволяет не только увеличить интенсивность ап-конверсионной люминесценции, но и визуализировать ближнее инфракрасное лазерное излучение в 2.0 и 1.0 мкм спектральных областях.

Список литературы

1. Liu X., Chen H., et al. // Nat. Commun. 2021. V. 12 (1). P. 5662.
2. Ghazy A., Safdar M., et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2021. V. 230. P. 111234.
3. Suo H., Zhu Q., et al. // Mater. Today Phys. 2021. V. 21. P. 100520.
4. Lin Y., Yao Y., et al. // Acta Biomater. 2021. V. 135. P. 1.
5. Wang M., Li M., et al. // Nano Res. 2015. V. 8 (6). P. 1800.
6. Auzel F. // Chem. Rev. 2004. V. 104 (1). P. 139.
7. Lyapin A.A., Gushchin S.V., et al. // Opt. Mater. Express. 2018. V. 8 (7). P. 1863.

М.А. ГАВРИЛОВА¹, А.А. ШЕЛЕМАНОВ², Д.А. ГАВРИЛОВА¹,
С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}

¹*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)*

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

³*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

ВЛИЯНИЕ МОРФОЛОГИИ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И АДСОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ZnO

В ходе работы были синтезированы однофазные нанокристаллические порошки ZnO полимерносолевым методом и термическим разложением нитрата. Исследованы морфология поверхности методами СЭМ и РФА и её влияние на люминесцентные и адсорбционные свойства синтезированных образцов.

M.A. GAVRILOVA¹, A.A. SHELEMANOV², D.A. GAVRILOVA¹,
S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3}

¹*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*

²*ITMO University, Saint-Petersburg*

³*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

MORPHOLOGY EFFECT ON THE LUMINESCENCE AND ADSORPTION PROPERTIES OF NANOCRYSTALLINE ZnO

In the course of the work, single-phase nanocrystalline ZnO powders were synthesized by the polymer-salt method and thermal decomposition of nitrate. The surface morphology by SEM and XRD analysis and its effect on the luminescence and adsorption properties of the synthesized samples was studied.

Наноструктурированные оксидные соединения широко применяются при изготовлении сорбентов, а также катализаторов и фотокатализаторов благодаря механической прочности, химической и термической стабильности. Известно, что за счёт полупроводниковых свойств оксидные фотокатализаторы на основе ZnO обладают высокой фотокаталитической активностью, что позволяет использовать их для очистки водных сред от органических загрязнителей [1]. Однако на эффективность фотокаталитического процесса существенное влияние оказывают адсорбционные свойства фотокатализатора, которые зависят не только от удельной площади поверхности, но и от особенностей её строения, формы и пространственного расположения частиц. Поэтому в

работе было изучено влияние морфологии поверхности на адсорбционные свойства ZnO, полученного с помощью термического разложения нитрата и полимерносолевого метода синтеза.

Нанокристаллический ZnO был получен путём растворения в 50 мл воды нитрата цинка и поливинилпирролидона (ПВП), взятого в качестве стабилизатора и источника теплоты в реакции горения, в массовом соотношении 1:1. Полученную смесь упаривали до состояния геля с последующей термообработкой при 550 °С в течение двух часов. Второй образец ZnO был синтезирован термическим разложением нитрата в тех же условиях. По результатам РФА был получен однофазный продукт состава ZnO со средним размером кристаллитов 26 ± 3 нм при использовании ПВП, и 48 ± 8 нм при термическом разложении нитрата. СЭМ-изображения показали, что поверхность ZnO, полученного путём термического разложения нитрата, представляет собой плотные частицы, спечённые в агломераты. Образец, синтезированный с применением полимерносолевого метода, обладает развитой губчатой структурой поверхности, которая формируется за счёт обильного газовыделения в процессе горения ПВП. Спектры фотолюминесценции образцов ZnO свидетельствуют, что условия синтеза оказывают влияние на формирование различных структурных дефектов. Для пористого образца, полученного с добавлением ПВП, более интенсивная полоса люминесценции связана с вакансиями Zn, а для спечённого образца, синтезированного разложением нитрата, – с кислородными вакансиями. Адсорбционные свойства порошков исследовали в их суспензиях с раствором красителя Chicago Sky Blue (CSB). Изменение концентрации красителя в растворе за счёт адсорбции на поверхности образцов ZnO фиксировали спектрофотометрически в течение двух часов. Для описания кинетики адсорбции CSB была использована кинетическая модель реакции первого порядка. Константы скорости адсорбции красителя составили 0.0110 мин^{-1} для пористого образца, синтезированного полимерно-солевым методом, и 0.0003 мин^{-1} для образца со спечёнными частицами, полученного в ходе термического разложения нитрата.

Таким образом, в работе показано, что морфология поверхности нанокристаллического ZnO в значительной степени влияет на его люминесцентные и адсорбционные свойства. При этом использование полимерно-солевого метода синтеза нанокристаллических порошков ZnO позволяет существенно увеличить эффективность сорбента за счёт адсорбции в пористой структуре.

Список литературы

1. Evstropiev S.K., et al. // Chem. Eng. Process. 2018. V. 134. P. 45-50.

Ю.Э. ГЕЙНЦ, Е.К. ПАНИНА

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

FDTD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ МИКРОКАПСУЛЫ В ОКРУЖЕНИИ ТВЁРДЫХ НАНОЧАСТИЦ

Рассмотрена динамика поглощения ближнего инфракрасного излучения сферической микрокапсулы в окружении твёрдых наночастиц различных оптических свойств (металл, биосовместимый диэлектрик). С помощью численного FDTD-моделирования установлено, что вследствие дифракции света на наночастицах возникает суперлокализация оптического поля с появлением «горячих областей» на поверхности микрокапсулы. Максимальный эффект (по поглощению света) от добавления наночастиц может достигать трёх раз.

Yu.E. GEINTS, E.K. PANINA

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the SB RAS, Tomsk

FDTD SIMULATION OF IR-ABSORPTION BY A SPHERICAL MICROCAPSULE SURROUNDED BY SOLID NANOPARTICLES

The dynamics of absorption of near-infrared radiation of a spherical microcapsule surrounded by solid nanoparticles of various optical properties (metal, biocompatible dielectric) is considered. With the help of numerical FDTD modeling, it was found that due to the diffraction of light on nanoparticles, superlocalization of the optical field occurs with the appearance of "hot regions" on the surface of the microcapsule. The maximum effect (in terms of light absorption) from the addition of nanoparticles can reach three times

Современное развитие технологий микрокапсулирования активных веществ направлено в сторону создания многофункциональных карго-носителей, представляющих собой микрочастицы с жидким ядром и поликомпозитной светопоглощающей оболочкой, восприимчивых к различным физическим и химическим внешним воздействиям для контролируемого высвобождения их содержимого [1]. Одним из перспективных, на наш взгляд, способов манипулирования уровнем поглощения светового излучения микрокапсулами является использование вспомогательных нано- или микрочастиц в качестве медиатора, влияющего на пространственное распределение источников

тепловыделения в оболочках микроконтейнеров. Создание локальных областей концентрации поля вблизи поверхности капсулы (зон фокусировок) позволит добиться существенного прироста эффективности утилизации световой энергии в тепло, используемое для термической активации микрокапсулы.

В настоящей работе микрокапсула моделировалась двухслойной частицей с непоглощающим световое излучение водным ядром, имитирующим полезный груз, и поглощающей свет твердофазной оболочкой. В качестве материала оболочки использовался технический силикон, легированный золотыми наночастицами, обеспечивающими оптическое поглощение в диапазоне 800 нм [2].

Зависимость поглощённой мощности в оболочке микрокапсулы от объёмной доли золотых наночастиц (НЧ) различного радиуса показана на рис. 1. Видно, что вспомогательный металлический аэрозоль с более крупным размером частиц приводит к большему поглощению излучения микрокапсулой вследствие большего усиления оптического поля. Так, 10-нм НЧ практически не изменяют характеристик поглощения капсулы, 15-нм НЧ уже дают 30 % повышение P_a , а ещё более крупный аэрозоль с радиусом 60 нм может увеличить данное значение почти втрое при максимальной концентрации НЧ.

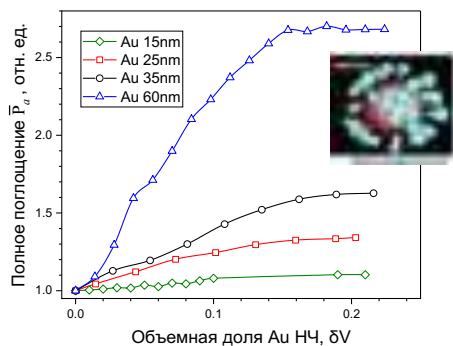


Рис. 1. Мощность излучения \bar{P}_a , поглощённая микрокапсулой в окружении ансамбля золотых наночастиц различных размеров и объёмной долей δV

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-21-00018.

Список литературы

1. Timin A.S., Gould D.J., et al. // Expert Opin. Drug Deliv. 2017. V. 14 (5). P. 583-587.
2. Geints Y.E., Panina E.K., et al. // JQSRT. 2019. V. 236. P. 106595-106600.

Д.В. БУЛЬГА¹, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, Д.А. ГАВРИЛОВА²,
А. МУССАУИ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

³Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ НАНОПОРОШКОВ Y₂O₃-Gd₂O₃:Ce³⁺, СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНО-СОЛЕВЫМ МЕТОДОМ

Приведены результаты экспериментов по синтезу и исследованию нанокристаллических порошков состава Y₂O₃-Gd₂O₃:Ce³⁺ с различным соотношением между оксидами иттрия и гадолиния. Было показано, что введение гадолиния не оказывает влияния на спектр люминесценции материала, а наблюдаемые полосы люминесценции соответствуют дефектам в структуре Y₂O₃.

D. V. BULYGA¹, S. K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, D. A. GAVRILOVA²,
A. MOUSSAOU¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

³S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

STUDY ON STRUCTURAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF Y₂O₃-Gd₂O₃:Ce³⁺ SYNTHESIZED VIA POLYMER-SALT METHOD

Presents the result of experiments on the synthesis and investigation of Y₂O₃-Gd₂O₃:Ce³⁺ nanocrystalline powders with different of gadolinium oxide content. It was shown that introduction of gadolinium has no influence on luminescence spectrum of the material and the luminescence bands observed in the spectrum can be attributed to residual defects in the yttrium oxide structure.

Материалы, активированные ионами церия, широко используются в качестве люминофоров и сцинтилляторов [1, 2]. В кристаллах оксида иттрия люминесценция трёхвалентных ионов церия не наблюдается, однако наблюдаются полосы, соответствующие дефектам кристаллической структуры Y₂O₃ [3]. Целью данной работы является

исследование влияния введения гадолиния в структуру оксида иттрия на его люминесцентные свойства.

Синтез нанокристаллических порошков осуществлялся при помощи полимерно-солевого метода, описанного в [4]. Полимерно-солевой метод является экономичным и эффективным, позволяет синтезировать наноматериалы с высокой однородностью химического состава. Концентрация церия во всех образцах – 1 масс.%

На рис. 1 представлены спектры люминесценции чистого $Y_2O_3:Ce^{3+}$, а также образцов, в которых 30 и 60 % атомов иттрия замещены на атомы гадолиния. Из рис. 1 видно, что введение гадолиния не оказывает влияния на спектр люминесценции, что может быть связано с тем, что источником наблюдаемой люминесценции являются дефекты кристаллической структуры, а не трёхвалентные ионы церия. Таким образом, введение гадолиния не оказывает влияния на дефектную структуру нанокристаллов оксида иттрия.

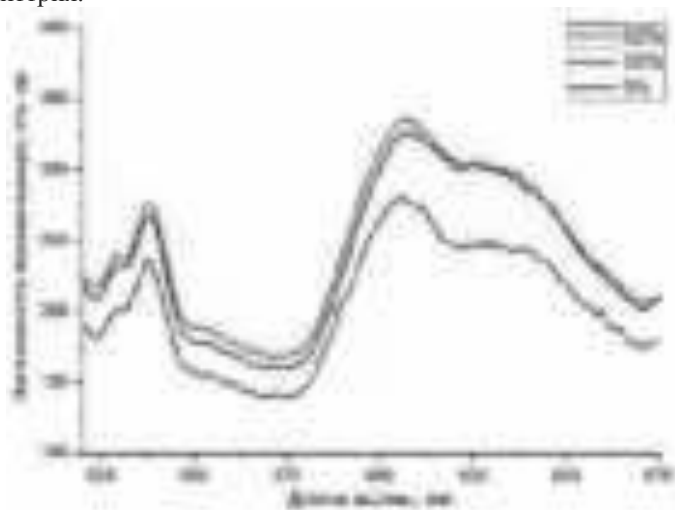


Рис. 1. Спектры люминесценции порошков $Y_2O_3-Gd_2O_3:Ce^{3+}$

Список литературы

1. Kim V.K., Zakharov A.I., et al. // Glass and Ceramics. 2014. V. 71 (1). P. 64-67.
2. Song W.S., Nam D.E., et al. // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. 2011. V. 6. P. 234-238.
3. Raukas M., Konrad A., Mishra K.C. // Journal of Luminescence. 2007. V. 122. P. 773-775.
4. Bulyga D.V., Evstropiev S.K. // Research on Chemical Intermediates. 2021. V. 47. P. 3501-3514.

Н.К. КУЗЬМЕНКО¹, Е.В. КОЛОБКОВА^{1,2}, Л.С. ЛОГУНОВ¹,
Н.В. НИКОНОРОВ¹, С.В. МАКАРОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТА ВО ФТОРФОСФАТНОЙ МАТРИЦЕ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Приведены результаты экспериментов по взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения со стеклом, содержащим элементы для формирования нанокристаллов перовскита CsPbBr₃. Показаны влияние скорости взаимодействия и энергии в лазерном импульсе на положение полосы люминесценции.

N.K. KUZMENKO¹, E.V. KOLOBKOVA^{1,2}, L.S. LOGUNOV¹,
N.V. NIKONOROV¹, S.V. MAKAROV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint-Petersburg

STUDY OF THE SPECTRAL AND LUMINESCENT PROPERTIES OF PEROVSKITE NANOCRYSTALS IN A FLUOROPHOSPHATES MATRIX OBTAINED BY THE METHOD OF PHOTO-INDUCED CRYSTALLIZATION

The results of experiments on the interaction of femtosecond laser radiation with glass containing elements for the formation of CsPbBr₃ perovskite nanocrystals are presented. The influence of the interaction rate and energy in the laser pulse on the position of the luminescence band is shown.

Нанокристаллы (НК) коллоидных перовскитов CsPbX₃ (X = Cl, Br, I) являются перспективным материалом для создания оптоэлектронных устройств. Они характеризуются интенсивной люминесценцией в диапазоне 410 - 700 нм с квантовым выходом до 90 %. Формирование НК в стёклах в случае локального нагрева под воздействием ультракороткого лазерного излучения позволяет получить нанокристаллы в объёме внутри матрицы. При этом на формирование квантовых точек влияют температура и длительность воздействия излучения. Ранее был

продемонстрирован рост НК CsPbBr_3 и CsPbX_3 ($X = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) в объёме стекла методом фотоиндуцированной кристаллизации [1, 2].

Целью работы является изучение влияния параметров фемтосекундного лазерного излучения на спектральное положение полосы люминесценции нанокристаллов перовскита. Было выбрано фторфосфатное стекло, содержащее прекурсоры для формирования галлоидных квантовых точек CsPbBr_3 . НК формировались за счёт лазерного воздействия и последующей термообработки при $T = 350^\circ\text{C}$. Варьировались скорость воздействия излучения и энергия в импульсе. На рис. 1 и 2 представлены полученные зависимости.

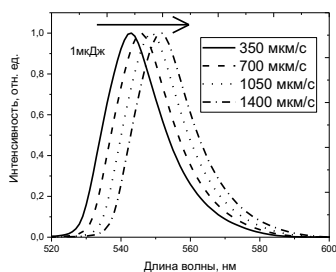


Рис. 1. Зависимость положения пика люминесценции от скорости записи

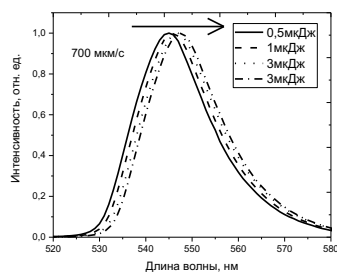


Рис. 2. Зависимость пика люминесценции от энергии импульса

Показано, что при увеличении скорости записи происходит длинноволновый сдвиг полосы люминесценции (543 - 552 нм), что быть объясняется формированием большего количества центров кристаллизации при большем времени экспозиции. Дальнейшая термообработка приводит к росту кристаллов меньшего размера за счёт ограниченного количества элементов, формирующих квантовые точки [5]. При увеличении энергии в лазерном импульсе также происходит небольшой сдвиг в длинноволновую область спектра (545 - 548 нм), это объясняется увеличением степени нагрева материала.

Список литературы

1. Huang X., Guo Q., et al. // Nature Photonics. 2020. V. 14. P. 82-88.
2. Ke Sun Dezhi, Tan Xinyuan., et al. // Science. 2022. V. 375. P. 307-310.
3. Liu X., Zhou J., et al. // Prog. Mater. Sci. 2018. V. 97. P. 38-96.

Д.В. БУЛЬГА¹, Д.А. ГАВРИЛОВА², С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3},
В.М. ВОЛЫНКИН³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

³Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

ВЛИЯНИЕ ИЗОМОРФНОГО ЗАМЕЩЕНИЯ Y³⁺ НА Gd³⁺ В НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКАХ YAG:Ce³⁺ НА ИХ СТРУКТУРНЫЕ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА

Приведены результаты экспериментов по синтезу и исследованию нанокристаллических порошков системы YAG:Ce³⁺ с изоморфным замещением ионов иттрия ионами гадолиния. Было показано, что при замещении от 60 % атомов иттрия атомами гадолиния при синтезе нанопорошков полимерно-солевым методом начинается образование фазы алюмината гадолиния. Введение ионов гадолиния оказывает влияние на соотношение полос люминесценции церия, что представляет интерес для применения предлагаемого материала в качестве люминофора.

D. V. BULYGA¹, D. A. GAVRILOVA², S. K. EVSTROPIEV^{1,2,3},
V. M. VOLYNKIN³

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

³S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

INFLUENCE OF ISOMORPHIC SUBSTITUTION OF Y³⁺ BY Gd³⁺ IN YAG:Ce³⁺ NANOPOWDERS ON THEIR STRUCTURAL AND LUMINESCENT PROPERTIES

Presents the result of experiments on the synthesis and investigation of nanocrystalline powders of the YAG:Ce³⁺ system with isomorphic substitution of yttrium by gadolinium, ions. It was shown that substitution of more than 60 % of yttrium by gadolinium ions leads to formation of gadolinium aluminate phase. Incorporation of gadolinium ions has an influence on the luminescence spectrum of cerium ions. Thus, this material is promising as a luminophore.

Порошки и керамики на основе алюмоиттриевого граната широко используются в качестве люминофоров, а также скинтилляторов [1, 2]. Изменение спектральных свойств представляет высокий интерес в задаче коррективы спектра светодиодов, для этого может быть использовано

частичное изоморфное замещение атомов иттрия атомами гадолия с сохранением структуры алюмоиттриевого граната.

В данной работе предлагается использование полимерно-солевого метод для синтеза люминофоров на основе $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ (1 масс.% Ce), ввиду его простоты и эффективности в задаче синтеза оксидных люминесцентных материалов [3]. Синтезированные порошки были исследованы методами рентгенодифракционного анализа, фурье-спектроскопии и люминесцентной спектроскопии. Было показано, что при замещении более 60 % атомов иттрия атомами гадолия происходит образование значительного количества паразитной фазы GdAlO_3 . Спектры люминесценции порошков с 10, 30 и 60 %-замещением атомов иттрия представлены на рис. 1. Из рис. 1 видно, что введение гадолия приводит к существенному изменению соотношения интенсивностей полос с максимумами около 550 и 400 нм. Также наблюдается сдвиг в длинноволновую область полосы с максимумом 550 нм.

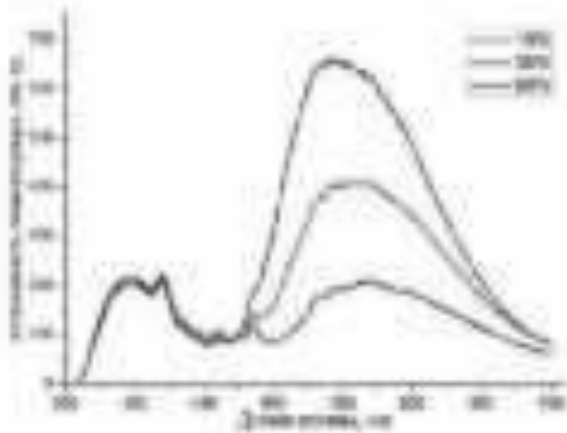


Рис. 1. Спектры люминесценции порошков $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}, \text{Gd}^{3+}$

Список литературы

1. Kim V.K., Zakharov A.I., et al. // Glass and Ceramics. 2014. V. 71 (1). P. 64-67.
2. Song W.S., Nam D.E., et al. // Journal of nanoelectronics and optoelectronics. 2011. V. 6. P. 234-238.
3. Bulyga D.V., Evstropiev S.K. // Research on Chemical Intermediates. 2021. V. 47. P. 3501-3514.

Д.Н. БУХАРОВ, В.Д. САМЫШКИН, А.Ф. ЛЕЛЕКОВА,
А.С. АБРАМОВ

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОНКОЙ C-Au ПЛЁНКИ

Приведены результаты моделирования туннельного фототока в тонкой C-Au плёнке в зависимости от степени освещённости. В качестве модельного приближения использовалась модель фото диода Шоттки.

D.N. BUKHAROV, V.D. SAMYSHKIN, A.F. LELEKOVA,
A.S. ABRAMOV

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs

SIMULATION OF THE PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF A THIN C-Au FILM

The results of modeling the tunneling photocurrent in a thin C-Au film depending on the degree of illumination are presented. The Schottky photodiode model was used as a model approximation.

Тонкие плёнки металлические плёнки на карбине, например из золота (C-Au) обладают уникальными фотоэлектрическими свойствами, что обуславливает перспективу их применения для задач разработки оптических электронных приборов [1]. Такие структуры могут быть получены лазерным синтезом, позволяющим задать наперед из фотоэлектрические свойства. Так, с помощью лазерного осаждения из коллоидного раствора наночастиц золота и цепочек карбина были получены тонкие плёнки, демонстрирующие фотоэлектрические свойства. В случае освещения образца лазерным излучением зелёного цвета проявлялся туннельный фототок, усиливающийся в зависимости от степени освещённости [2]. Для оценки полученных зависимостей применялся аппарат математического моделирования. Вольт-амперные характеристики моделировались в приближении фото диода Шоттки как сумма темнового тока I_d фототока I_{ph} : $I = I_d + I_{ph}$ [3]. Темновой ток оценивался как: $I_d = I_0 \exp(qU/Nkt) - I$ [4], где $I_0 = RA^*TS \exp(-\phi/kT)$, q – заряд электрона, ϕ – потенциальный барьер, U – напряжение, k – постоянная Больцмана, T – температура, A^* – константа Ричардсона,

S – площадь контакта, R – коэффициент отражения электронов, N – коэффициент идеальности. Температура полагалась равной 293 К, площадь контакта – $10^{-16}\pi$ (м).

Фототок оценивался как $I_{ph} = (qF\mu\tau/d^2) \gamma$ [5], где $F = (2qU/m_e)^{1/2}$ – скорость движения свободных электронов, $\mu = (F*U)/d$ – подвижность, d – расстояние от плёнки до зонда (1 нм), m_e – масса электрона, τ – время жизни (10^{-10} с), γ – степень освещённости, являлась подгоночным коэффициентом и оценивалась как $\gamma = I_{100}I_\gamma$, где I_{100} – измеренный ток при 100 % освещённости, I_γ – измеренный ток при освещённости в γ %.

На рис. 1 приведены модельные вольт-амперные характеристики туннельного тока в случае различной интенсивности освещённости для отрезка напряжений от 0.1 до 1 В, построенные в MATLAB с использованием аппроксимации сплайнами.

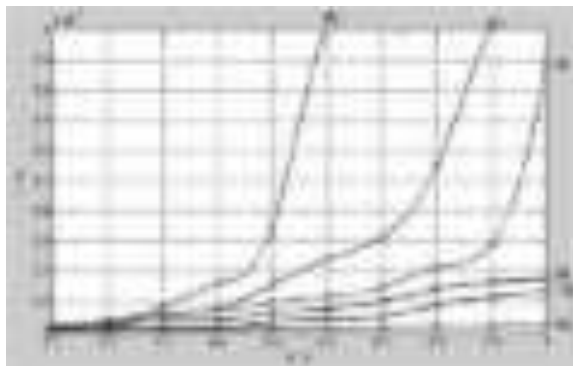


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики туннельного тока при различных степенях освещённости: (1) – темновой ток, (2) – 5 %, (3) – 25 %, (4) – 50 %, (5) – 75 %, (6) – 100 %

Для предложенной модели удалось добиться погрешности порядка 10^{-2} , что свидетельствует об удовлетворительной степени адекватности и позволяет в первом приближении оценить фотоэлектрические свойства полученных структур.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-02-00515 А.

Список литературы

1. Yakubovsky D.I., et al. // *Nanomaterials* (Basel). 2018. V. 8 (12). P. 1058.
2. Samyshkin V., Lelekova A., Osipov A., et al. // *Opt Quant Electron*. 2019. V. 51. P. 394.
3. Rizzo A. // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2017. V. 6 (6). P. 1542-1548.
4. Bartolomeo A. // *Phys. Rep*. 2016. V. 606. P. 1-58.
5. Chen, et al. // *Nanoscale Research Letters*. 2011. V. 6. P. 350.

Э.Қ. МУСАБЕКОВА, А.К. АЙМУХАНОВ, А.М. ЖАҚАНОВА,
Б. КОМАНДИР

Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Казахстан

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ SnO₂ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЁНОК

В данной работе методом термического оксидирования индия были получены плёнки оксида олова (SnO₂). Исследовалось влияние термического отжига на морфологию, структуру, оптические свойства SnO₂. Отжиг плёнок проводился в диапазоне температур 300 - 500 °С. С увеличением температуры отжига наблюдается увеличение размера зерна и повышение ширины запрещённой зоны SnO₂. Методом импедансной спектроскопии исследовалось динамика переноса носителей заряда.

A.K. MUSSABEKOVA, A.K. AIMUKHANOV,
A.M. ZHAKANOVA, B. KOMANDIR

Karaganda Buketov University, Kazakhstan

EFFECT OF STRUCTURAL FEATURES OF SnO₂ ON THE ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF FILMS

In this work, tin oxide (SnO₂) films were obtained by the thermal oxidation of indium. The effect of thermal annealing on the morphology, structure, and optical properties of SnO₂ was studied. The films were annealed in the temperature range of 300 - 500 °C. With an increase in the annealing temperature, an increase in the grain size and an increase in the band gap of SnO₂ are observed. The dynamics of charge carrier transfer was studied by impedance spectroscopy.

Получение плёнок SnO на подложке проводилось испарением порошка Sn (Sigma-Aldrich, powder, 99.99 % trace metals basis) методом вакуумного термического осаждения на установке CY-1700x-spc-2 (Zhengzhou CY Scientific Instruments Co., Ltd) и последующим отжигом плёнок в атмосфере воздуха при температурах 300 - 500 °С в течение часа.

Измерения спектров импеданса проводились при помощи потенциостата-гальваностата Р45Х в режиме импеданса. На рис. 1 представлены измеренные спектры импеданса. Спектры импеданса описываются эквивалентной электрической схемой, показанной на вставке рис. 1, где R₁ – эквивалентное сопротивление внешних электродов (R_{FTO}+R_{SnO}+Ag). R₂ – межфазное сопротивление, характеризующее рекомбинацию дырок и электронов соответственно.

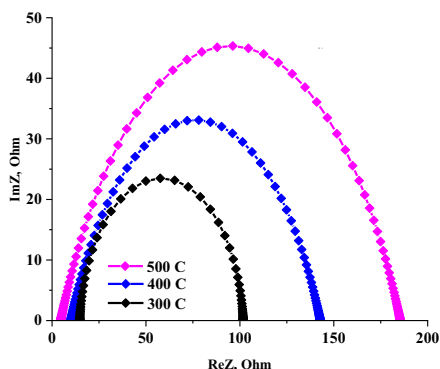


Рис. 1. Влияние температуры отжига плёнок SnO на спектры импеданса

В табл. 1 показаны полученные значения R_1 , R_2 . Как видно из табл. 1 значение R_0 имеет наибольшее значение у ячейки с SnO отожжённой при 300 °С, R_1 представляет суммарное сопротивление внешних электродов и прилегающих слоёв. Так как в исследуемых ячейках все функциональные слои, кроме SnO, были получены при одинаковых условиях, наблюдаемые изменения R_1 связаны с изменением сопротивления плёнок SnO. Дальнейший рост температуры отжига SnO приводит к уменьшению R_1 . R_2 , сопротивления характеризующее рекомбинацию электронов на границе раздела SnO/Ag, меняется в зависимости от температуры отжига. Чем больше R_2 тем меньше скорость рекомбинации на границе раздела фаз. Как видно из табл. 1 отжиг SnO при 300 °С и выше приводит к увеличению рекомбинационного сопротивления в семь раз.

Таблица 1. Значение электрофизических параметров плёнок

N_0	<i>Films</i>	R_w (<i>Ohm</i>)	R_{rec} (<i>Ohm</i>)	R_{rec}/R_w	τ_{eff} (<i>msec</i>)	k_{eff} (<i>sec⁻¹</i>)
1	300 C	16.9	99.2	5.8	0.17	7102
2	400 C	10.6	142.5	13.4	0.07	8071
3	500 C	4.7	185.1	39.3	0.02	11679

Список литературы

1. Yoon S., Kim S.J., Kim H.S. Solution-processed indium oxide electron transporting layers for high-performance and photo-stable perovskite and organic solar cells // *Nanoscale*. 2017. V. 9 (42). P. 16305-16312.

Д.С. ДАЙБАГЕ^{1,2,3}, И.А. ЗАХАРЧУК^{1,2}, А.В. ОСАДЧЕНКО^{1,2,3},
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2}, М.Л. СКОРИКОВ²,
М.Э. ГЕХТ¹, Р.Б. ВАСИЛЬЕВ⁴

¹*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

³*Московский политехнический университет*

⁴*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КВАНТОВОРАЗМЕРНОГО ЭФФЕКТА В УЛЬТРАТОНКИХ НАНОПЛАСТИНАХ СЕЛЕНИДА КАДМИЯ

Приведены результаты исследования абсорбционных и эмиссионных свойств ультратонких коллоидных нанопластин селенида кадмия при различных значениях толщины. Обнаружено коротковолновое смещение спектров поглощения и люминесценции. Данные явления объяснены квантово-размерным эффектом.

D.S. DAIBAGYA^{1,2,3}, I.A. ZAKHARCHUK^{1,2}, A.V. OSADCHENKO^{1,2,3},
A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, S.A. AMBROZEVIICH^{1,2}, M.L. SKORIKOV²,
M.E. GEKHT¹, R.B. VASILEV⁴

¹*Bauman Moscow State Technical University*

²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

³*Moscow Polytechnic University*

⁴*Lomonosov Moscow State University*

SPECTRAL MANIFESTATIONS OF THE QUANTUM CONFINEMENT EFFECT IN ULTRATHIN CADMIUM SELENIDE NANOPATELETS

The results of the study of absorption and emission of ultrathin colloidal cadmium selenide nanoplatelets with different thicknesses are presented. A short-wave shift of absorption and luminescence spectra was detected. These phenomena were explained by the quantum confinement effect.

В последнее время в светодиодах, наряду с органическими и металлоорганическими люминофорами, стали использовать наноструктуры различной геометрии [1, 2]. Это связано с тем фактом, что варьирование размера наночастиц даёт возможность управлять как межзонными переходами – экситонной люминесценцией, так и люминесценцией, связанной с дефектными состояниями [3].

Проведённые в данной работе исследования посвящены изучению и сравнению оптических свойств наночастиц селенида кадмия планарной геометрии, средняя толщина которых составляет примерно 2,5 монослоя (МС), по отношению к более толстым нанопластинам [2].

В спектрах поглощения (рис. 1) наблюдаются характерные особенности, связанные с переходами $1S_{lh} - 1S_e$ и $1S_{hh} - 1S_e$ между подзонами лёгких и тяжёлых дырок в валентной зоне и зоной проводимости.

В спектрах фотолуминесценции (ФЛ) коллоидных нанопластинок CdSe на рис. 2 наблюдаются две полосы, узкая полоса связана с межзонными переходами, а широкая с поверхностными состояниями. Стоит отдельно отметить, что, несмотря на наличие межзонной полосы поглощения в коротковолновой области спектра, второй более коротковолновый экситонный пик ФЛ отсутствует. Это объясняется тем, что время преобразования лёгкой дырки в тяжёлую гораздо меньше, чем время излучательной релаксации. Смещение полос поглощения и ФЛ в красную область спектра при увеличении среднего размера наночастиц обусловлено проявлением квантово-размерного эффекта.

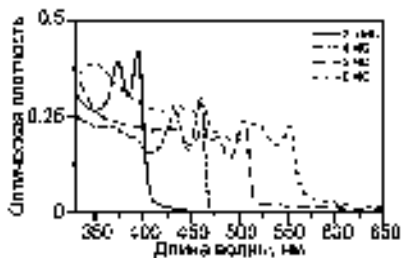


Рис. 1. Спектры поглощения

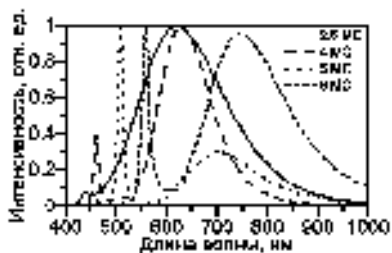


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции

Исследование проведено в рамках проекта РФФИ 20-02-00222 А.

Список литературы

1. Vashchenko A.A., Osadchenko A.V., Selyukov A.S., et al. Electroluminescence of Coumarin-Based Dyes. // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. 2022. V. 49. P. 74-77.
2. Селоков А.С., Витухновский А.Г., Лебедев В.С. и др. Электролюминесценция коллоидных квазидвумерных полупроводниковых наноструктур CdSe в гибридном светоизлучающем диоде. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2015. Т. 147. № 4. С. 687-701.
3. Kondratenko T.S., Smirnov M.S., Ovchinnikov O.V., et al. Size-dependent optical properties of colloidal CdS quantum dots passivated by thioglycolic acid // Semiconductors. 2018. V. 52. No. 9. P. 1137-1144.

Г.Т. ВАСИЛЮК, П.В. КАРПАЧ, А.А. МАСКЕВИЧ, Т.С. ГЛЕБОВИЧ,
А.О. АЙТ¹, О.В. ВЕНИДИКТОВА¹, Т.М. ВАЛОВА¹, С.А. МАСКЕВИЧ²

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь

¹*Центр фотохимии ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва*

²*Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова,
Минск, Беларусь*

ПРОЯВЛЕНИЕ ФОТОХРОМИЗМА В СПЕКТРАХ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ДИАРИЛЭТЕНА И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Обнаружены и исследованы фотоиндуцированные изменения колебательных спектров (ИК поглощения) нанокomпозитных систем, содержащих наночастицы Ag и молекулы фотохромного диарилэтена ДАЭ1, аналогичные наблюдаемым для твердофазных плёнок ДАЭ1 в отсутствие наночастиц.

G.T. VASILYUK, P.V. KARPACH, A.A. MASKEVICH,
T.S. GLEBOVICH, A.O. AYT¹, O.V. VENIDIKTOVA¹, T.M. VALOVA¹,
S.A. MASKEVICH²

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

¹*Photochemistry Center of FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS, Moscow*

²*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk,
Belarus*

MANIFESTATION OF PHOTOCROMISM IN THE IR SPECTRA OF NANOCOMPOSITES BASED ON DIARYLETHENE AND SILVER NANOPARTICLES

Photoinduced changes in the vibrational spectra (IR absorption) of nanocomposite systems containing Ag nanoparticles and molecules of photochromic diarylethene DAE1 similar to those observed for solid-phase DAE1 films in the absence of nanoparticles have been found and studied.

Большой интерес представляет исследование свойств фотохромных соединений в нанокomпозитных структурах (системах) с металлическими наночастицами – для возможного применения в фотоуправляемых переключателях электрического и оптического сигнала или сенсорах [1, 2]. В качестве фотохромных соединений перспективно использование термически необратимых диарилэтен (ДАЭ), обратимо изменяющих свои свойства под действием света. Плазмонное усиление

электромагнитного поля вблизи наночастицы металла в таких нанокompозитах обеспечивает повышение эффективности фотохромных превращений [1] благодаря как формированию двухфотонной фотохромной реакции цикловерсии ДАЭ, так и повышению скорости однофотонной реакции в 2 - 5 раз.

В настоящей работе методами спектроскопии инфракрасного (ИК) поглощения, комбинационного рассеяния (КР) света и квантовой химии исследованы колебательные спектры нанокompозитных систем, содержащих металлические наночастицы и молекулы фотохромного диарилэтена ДАЭ1. Обнаружено, что данные нанокompозиты обладают фотохромными свойствами (которые проявляются в обратимых фотоиндуцированных изменениях электронных и колебательных спектров диарилэтена), подобными фотохромным свойствам ДАЭ1 в растворах и в твердофазных слоях, не содержащих наночастиц (рис. 1). Фотопревращения композитных наноструктур проявляются в изменении относительной интенсивности полос (около 1181, 1529, 1583 cm^{-1}) в спектрах ИК-поглощения соединения ДАЭ1, относящихся к колебаниям связи, участвующей в реакции фотоизомеризации (рис. 2).

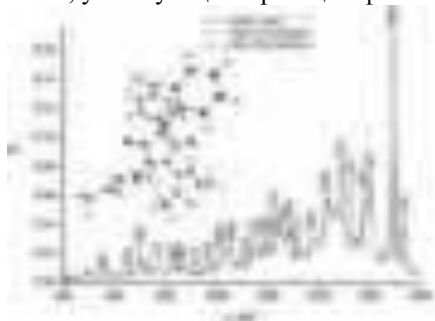


Рис. 1. Спектры инфракрасного поглощения (до, после УФ-облучения и после последующего видимого облучения) фотохромного диарилэтена ДАЭ1

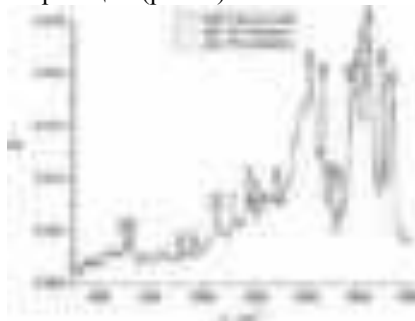


Рис. 2. Спектры инфракрасного поглощения (до, после УФ-облучения и после последующего видимого облучения) фотопереключаемых наноструктур на основе наночастиц Ag и фотохромного диарилэтена ДАЭ1

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № Ф21PM-134) и Министерства образования Республики Беларусь (задание 1.5 ГПНИ “Фотоника и электроника для инноваций”).

Список литературы

1. Klajn R., Stoddart J.F., Grzybowski B.A. // Chem. Soc. Rev. 2010. V. 39. P. 2203.
2. Vasilyuk G.T., et al. // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 130. No. 3. P. 361.

П.В. КАРПАЧ, Г.Т. ВАСИЛЮК, С.Д. ГОГОЛЕВА, И.В. ОЖОГИН¹,
А.Д. ПУГАЧЕВ¹, Б.С. ЛУКЪЯНОВ¹, С.А. МАСКЕВИЧ²

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь
¹*НИИ физической и органической химии Южного федерального университета,*
Ростов-на-Дону

²*Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова,*
Минск, Беларусь

УСИЛЕНИЕ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА В НАНОКОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ БИС-СПИРОПИРАНА И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

Исследовано усиление комбинационного рассеяния света в нанокompозитных системах, содержащих металлические наночастицы и молекулы бис-спиропиранов индолинового ряда.

P.V. KARPACH, G.T. VASILYUK, S.D. GOGOLEVA, I.V. OZHOGIN¹,
A.D. PUGACHEV¹, B.S. LUKYANOV¹, S.A. MASKEVICH²

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

¹*Institute of Physical and Organic Chemistry, Southern Federal University, Rostov-on-Don*

²*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University, Minsk,*
Belarus

RAMAN SCATTERING ENHANCEMENT IN NANOCOMPOSITES BASED ON BIS-SPIROPYRAN AND SILVER NANOPARTICLES

The enhancement of Raman scattering in nanocomposite systems containing metal nanoparticles and indoline bis-spiropyran molecules has been studied.

Бис-фотохромные соединения, и в частности, бис-спиропираны представляют несомненный интерес для исследователей, так как последовательное или параллельное открытие их фотоактивных фрагментов потенциально позволяет существовать данным соединениям в виде трёх и более изомеров, что делает их прототипами мультипозиционных молекулярных переключателей для целей молекулярной электроники [1]. Spirocyclic photochromic systems with enhanced functional activity, capable of immobilization on various (including metallic) surfaces

являются перспективными объектами исследования в области хемо- и биосенсорики, молекулярной электроники и фотоники.

В настоящей работе методами спектроскопии комбинационного рассеяния (КР), гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) света и квантовой химии исследованы колебательные спектры нанокомпозитных систем, содержащих металлические наночастицы и молекулы симметричных бис-спиропиранов индолинового ряда (пример на рис. 1). Из анализа спектров ГКР света данных нанокомпозитов следует, что наибольшее усиление испытывают полосы КР около 556, 806, 929, 1117, 1235, 1268, 1290, 1352, 1404, 1465, 1528, 1573, 1613 см^{-1} , основной вклад в которые вносят плоские колебания циклов (пример на рис. 2). Гладкая сфероидальная форма наночастиц серебра (без мелких шероховатостей с резкими изломами поверхности), а также их размеры позволяют полагать, что в усиление сигнала КР молекул SP1, адсорбированных на этих частицах, наибольший вклад вносят плазмонные механизмы, а не другие электромагнитные механизмы усиления.

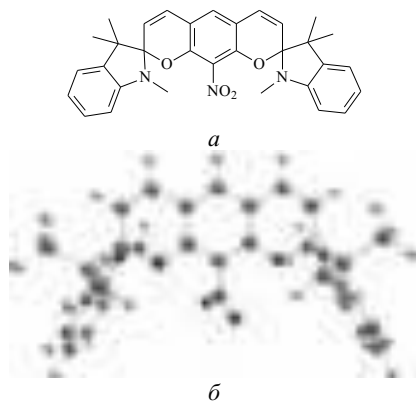


Рис. 1. Структурная формула (а) и оптимизированная структура (б) молекулы бис-спиропирана SP1

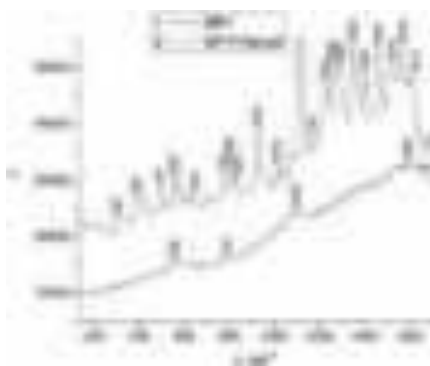


Рис. 2. Спектры КР света (1) порошка бисспиропирана SP1 и ГКР света (2) нанокомпозитов на основе наночастиц Ag и бис-спиропирана SP1

Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ (грант № Ф21PM-134) и РФФИ (грант № 20-53-04023).

Список литературы

1. Ozhogin I.V., et. al. // Journal of Molecular Structure. 2020. V. 230. P. 128808.

Ю.Э. ГЕЙНЦ, Е.К. ПАНИНА, К.С. ПАНИН¹

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОСФЕР НА ПАРАМЕТРЫ ФОРМИРУЕМЫХ ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ

Рассмотрено влияние искажений поверхности сферических диэлектрических микрочастиц на параметры «фотонных наноструй» (ФНС), формирующихся в ближней зоне рассеяния световой волны. С помощью численного моделирования исследованы основные характеристики ФНС (пространственные размеры и пиковая интенсивность). Проведено сравнение с микрочастицей, имеющей идеальную сферическую поверхность. Установлена зависимость мощностных характеристик ФНС от амплитуды искажений поверхности микросфер.

Yu.E. GEINTS, E.K. PANINA, K.S. PANIN¹

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk
¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

INFLUENCE OF SMALL SURFACE DISTORTIONS OF DIELECTRIC MICROSPHERES ON THE PARAMETERS OF FORMED PHOTONIC NANOJETS

The effect of surface distortions of spherical dielectric microparticles on the parameters of «photonic nanojets» (PNJ) formed in the near zone of scattering by a light wave is considered. Numerical simulations were used to study the main characteristics of the PNJ (spatial dimensions and peak intensity). A comparison is made with a microparticle having an ideal spherical surface. The dependence of the power characteristics of the PNJ on the amplitude of distortions of the surface of microspheres has been established.

Развитие научных направлений, связанных, например, с прецизионной диагностикой параметров дисперсных сред, нано-конструированием материалов, требует создания высоко концентрированного оптического излучения вблизи поверхности малых материальных объектов. Наиболее востребованными с практической точки зрения по-прежнему остаются непоглощающие сферические диэлектрические микрочастицы различных физических свойств и структурного состава, формирующие высоко локализованные области повышенной интенсивности – так называемые,

«фотонные наноструи» (ФНС) [1]. При численном моделировании эффекта ФНС, как правило, рассматривают частицы, имеющие идеальную сферическую поверхность. На практике же, достичь подобной идеальности крайне сложно, а любое, даже незначительное, искажение поверхности влечёт за собой изменение характеристик поля в области внешнего фокуса.

Моделирование рассеяния оптического излучения с длиной волны $\lambda = 0.5$ мкм на сферических частицах радиуса $R = 1$ мкм и показателем преломления $n = 1.45$ проводилось на основе численного решения системы дифференциальных уравнений Максвелла (FDTD-метод). Структура возмущений поверхности частицы задавалась случайным параметром ξ , характеризующим шероховатость в двух направлениях (x и y). Зависимость максимальной интенсивности V_{max} поля в области ФНС показана на рис. 1. Установлено, что отклонение формы микрочастицы от сферической приводит к падению интенсивности ФНС до 20 % (для рассмотренных случаев). Причём значение V_{max} определяется, главным образом, параметром ξ и практически не зависит от пространственной частоты искажений. Вопреки ожиданиям, явно выраженных зависимостей пространственных размеров струи от размеров искажений выявлено не было.

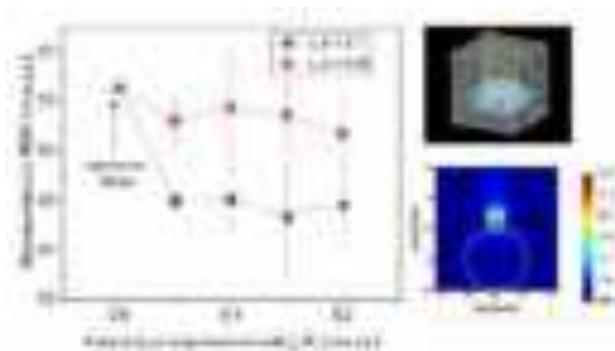


Рис. 1. Зависимость интенсивности ФНС

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ИОА СО РАН.

Список литературы

1. Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A. // JOSA B. 2011. V. 28. No. 8. P. 1825-1830.

А. ЭГБАЛИ, А.А. ВИШНЕВЫЙ

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАДИАЛЬНО АНИЗОТРОПНЫХ НАНОСФЕР

В связи с активным использованием анизотропных ван-дер-ваальсовых материалов для изготовления резонаторов, представляет интерес поиск оптимальных оптических параметров материалов, необходимых для получения резонансов высокой добротности. В данной работе проведено изучение мультипольных резонансов наносфер из материала с показателем преломления 4. При моделировании радиальная компонента показателя преломления варьировалась от 1 до 15, что позволило обнаружить преимущество анизотропных материалов с низкими и высокими значениями радиальной компоненты показателя преломления.

A. EGHBALI, A.A. VYSHNEVYY

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

OPTICAL PROPERTIES OF RADIALY ANISOTROPIC NANOSPHERES BY ULTRASHORT LASER PULSES

Growing use of anisotropic van der Waals materials for fabrication of resonators motivates the search of optimal parameters of materials that enable high quality resonances. Here, we studied multipolar resonances of the nanospheres from a material with refractive index of 4. During simulations we have varied the radial component of the refractive index from 1 to 15, which allowed us to establish the advantages of highly anisotropic materials with high and low radial refractive index.

Ван-дер-ваальсовы материалы обладают уникальными физическими свойствами, которые широко используются в различных областях науки и промышленности. Недавно было обнаружено, что их структурная анизотропия обуславливает гигантскую анизотропию оптического отклика [1]. В связи с этим важно понимать, как сильная анизотропия влияет на характеристики устройств, в которых используются такие материалы. В данной работе проведено изучение влияния анизотропии на оптические свойства наноструктур с радиальной анизотропией, в частности, сферических наночастиц, которые недавно были успешно изготовлены [2].

Исследовалась добротность мультипольных резонансов в радиально анизотропных наносферах (рис. 1а). Предполагая постоянную

тангенциальную оптическую постоянную, мы обнаружили, что добротность резонансов увеличивается с увеличением радиальной составляющей показателя преломления (рис. 1*b*). Это поведение аналогично поведению изотропных наносфер и обусловлено главным образом увеличением усреднённой диэлектрической проницаемости сферы. В то же время, когда радиальная составляющая уменьшается, добротность также может увеличиваться, особенно когда радиальная составляющая приближается к 1. Это поведение неожиданно, хотя его можно объяснить используя понятие эффективного показателя преломления для рассеяния, введённого в нашей предыдущей работе [3]. Этот эффективный показатель преломления увеличивается с уменьшением радиальной компоненты показателя преломления материала, что, в свою очередь, может привести к подавлению излучательных потерь соответствующего резонанса Ми. Наша работа даёт представление о желаемых свойствах материалов резонаторов и может быть полезна для проектирования устройств на основе анизотропных материалов [3].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-10312).

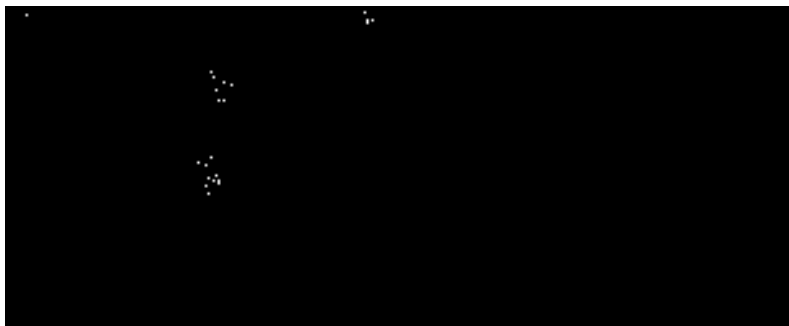


Рис. 1. Сфера с радиальной анизотропией (*a*), добротность дипольного резонанса как функция радиальной компоненты показателя преломления для сферы с показателем преломления 4 (*b*)

Список литературы

1. Ermolaev G.A., Grudin D.V., et al. // Nat Commun. 2021. V. 12. P. 854.
2. Tselikov G.I., Ermolaev G.A., et al. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2022. V. 119. P. e2208830119.
3. Eghbali A., Vyshnevyy A.A., et al. // Biosensors. 2022. V. 12(8). P. 582.

К.А. ЛОЗОВОЙ, В.В. ДИРКО, О.И. КУКЕНОВ, А.П. КОХАНЕНКО
Национальный исследовательский Томский государственный университет

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВЕРХСТРУКТУРНЫХ ПЕРЕХОДОВ ПРИ РОСТЕ НАНОСТРУКТУР Ge/Si (111)

Представлены результаты исследования процессов эпитаксиального роста германия на кремнии с кристаллографической ориентацией (111) в широком интервале температур. С помощью метода дифракции быстрых отражённых электронов определены температурные зависимости продолжительности стадии перехода из сверхструктуры 7×7 в 5×5 и значения критической толщины перехода от двумерного к трёхмерному росту в диапазоне от 250 до 700 °С. Показано, что время перехода от сверхструктуры 7×7 к сверхструктуре 5×5 зависит от температуры эпитаксиального роста.

К.А. LOZOVY, V.V. DIRKO, O.I. KUKENOV, A.P. KOKHANENKO
National Research Tomsk State University

TEMPERATURE PECULIARITIES OF SUPERSTRUCTURE TRANSITIONS DURING GROWTH OF Ge/Si (111) NANOSTRUCTURES

The results of studying the processes of epitaxial growth of germanium on silicon with crystallographic orientation (111) in a wide temperature range are presented. The temperature dependences of the duration of the transition stage from the 7×7 to 5×5 superstructure and the values of the critical thickness of the transition from two-dimensional to three-dimensional growth in the range from 250 to 700 °C are determined using the high energy reflection electron diffraction method. It is shown that the transition time from the 7×7 superstructure to the 5×5 superstructure depends on the temperature of epitaxial growth.

Наноструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками уже около десятка лет активно используются при создании фотодетекторов, солнечных элементов и светоизлучающих устройств для таких быстро развивающихся областей как наноэлектроника и нанопотоника [1, 2]. Кроме того, в последнее время осознается перспективность использования подобных структур для создания приборов совершенно нового уровня, например, топологических транзисторов, твердотельных спиновых кубитов, высокочувствительных сенсоров.

Поверхность Si(111) была выбрана для исследования процессов эпитаксиального роста германия в связи с тем, что эта поверхность менее изучена по сравнению с поверхностью Si(001). При этом поверхность чистого кремния с кристаллографической ориентацией (111) традиционно используется для эпитаксии германия и также является весьма перспективной с точки зрения создания приборных структур. Кроме того, именно на поверхностях с кристаллографической ориентацией (111) возможно создание графеноподобных двумерных материалов, на которые возлагаются большие надежды для создания электроники будущего.

Синтез Ge на подложке Si(111) осуществлялся на установке высоковакуумной молекулярно-лучевой эпитаксии «Катунь-100». Все эксперименты проводились при уровне вакуума $1 \cdot 10^{-9}$ Торр. Для исследований использовались коммерчески доступные пластины Si(111) с отклонением от кристаллографической плоскости $< 0,5^\circ$. Перед началом работы пластины проходили предэпитаксиальную подготовку, состоящую из химической обработки и термического отжига в сверхвысоком вакууме. Перед проведением эпитаксиального роста плёнки, на поверхность пластины наносится буферный слой кремния толщиной > 100 нм. Температура кремниевой подложки при создании буфера составляет 700°C . Затем пластина отжигается в течение пяти минут при 1000°C , после чего она охлаждается до необходимых ростовых температур.

В работе показано, что в области низких температур (до 450°C) рост Ge на Si(111) осуществляется по классическому механизму Странского-Крастанова с максимальной критической толщиной двумерного слоя Ge $10,6 \text{ \AA}$ при температурах $300 - 350^\circ\text{C}$ и последующим формированием 3D-островков. При температурах выше 450°C релаксация упругих напряжений происходит полностью за счёт сверхструктурных переходов $7 \times 7 - 5 \times 5$ и при увеличении температуры подложки от 400 до 650°C продолжительность этого процесса (выраженная в толщине осаждённого материала) увеличивается от $0,1$ до 2 мс.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № FSWM-2020-0048.

Список литературы

1. Wang B., Mu J. // PhotoniX. 2022. V. 3. P. 8.
2. Lozovoy K.A., Izhnin I.I., et al. // Nanomaterials. 2022. V. 12. P. 2221.

И.М. КРОЛЬ, К.И. РУНИНА, А.А. ПИЯКИНА,
Е.М. ЩИГОЛЕВА, О.П. БАРИНОВА

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩИХ СТЁКОЛ СОСТАВОВ $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ и $K_2O-ZnO-SiO_2$

В системе $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ и $K_2O-ZnO-SiO_2$ при 1350 °С получены стекловидные материалы, легированный кобальтом. Оба состава характеризуются расположением на диаграмме состояния в области кристаллизации виллемита (Zn_2SiO_4). При исследовании спектров поглощения в оптической и ближней ИК-областях показана перспективность стёкол таких составов в качестве поглотителей излучения в ИК-диапазоне 1,3 - 1,7 мкм.

I.M. KROL, K.I. RUNINA, A.A. PIYAKINA,
E.M. SCHIGOLEVA, O.P. BARINOVA

Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

STUDY OF ABSORPTION SPECTRA IN VISIBLE AND IR RANGE OF COBALT-CONTAINING ZINC BOROSILICATE GLASS MATERIAL

Cobalt-doped glassy materials were obtained in the $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ and $K_2O-ZnO-SiO_2$ systems at 1350 °C. Both compositions are characterized by their location on the phase diagram in the crystallization region of willemite (Zn_2SiO_4). When studying the absorption spectra in the optical and near-IR regions, glasses of such compositions are shown to be promising as radiation absorbers in the IR range of 1.3-1.7 μm .

В настоящее время множество исследований посвящены оптически прозрачным материалам, содержащим ионы кобальта в тетракоординированном состоянии [1 - 4]. Такие материалы характеризуются полосами поглощения высокой интенсивности в видимой области и ближнем ИК-диапазоне [2, 3]. Введение оксидов щёлочных металлов, особенно K_2O , в состав стёкол, как показано в ряде работ [4], способствует формированию групп $[CoO_4]$ тетраэдрического и искажённого тетраэдрического строения.

В тетраэдрической симметрии энергетические уровни иона Co^{2+} представляют собой ${}^2E({}^2G)$, ${}^2T_1({}^2G)$, ${}^4T_1({}^4P)$, ${}^2A_1(G)$ и ${}^2T_2(G)$ с основным состоянием ${}^4A_2({}^4F)$. Тетраэдрический ион кобальта в различных

материалах демонстрирует два спин-запрещённых перехода ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4P)$ и ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$ соответственно. Высокая интенсивность этих полос является следствием смешения 3d-орбиталей Co^{2+} с его 4p-орбиталями и орбиталями лиганда.

В данной работе были получены прозрачные стёкла в системах $ZnO-B_2O_3-SiO_2:Co^{2+}$ и $K_2O-ZnO-SiO_2:Co^{2+}$ при температуре 1350 °С с временем варки два часа и последующим отжигом при температуре 600 °С для снятия термических напряжений. Стекло в системе $ZnO-B_2O_3-SiO_2:Co^{2+}$ было сине-фиолетовым, а в системе $K_2O-ZnO-SiO_2:Co^{2+}$ – синим с зеленоватым оттенком. Спектры поглощения полученных стёкол показывают наличие характерных для кобальтсодержащих прозрачных материалов полосы поглощения (рис. 1).

Такие материалы имеют полосу поглощения в области 1,3 - 1,7 мкм за счёт перехода ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$, что является необходимым условием их использования в качестве насыщающихся поглотителей для лазеров с длиной волны в этой области.

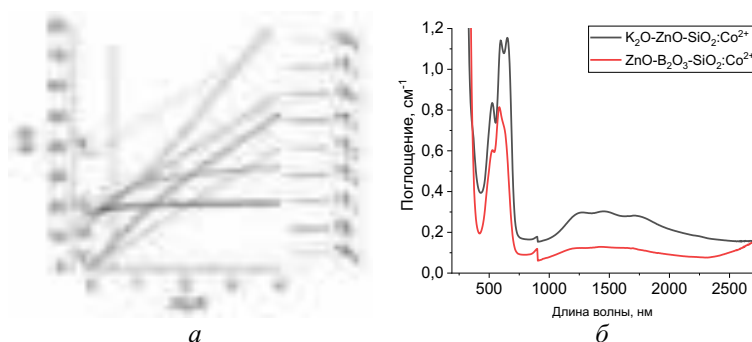


Рис. 1. Схема электронных уровней Co^{2+} (а) и диаграмма Танабе Сугано (б) для d^3 электронной конфигурации, которая используется для описания силы кристаллического поля и полученные спектры поглощения полученных стёкол

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FSSM-2020-0005.

Список литературы

1. Dondi M., et al. // American Mineralogist. 2014. V. 99. P. 1736-1745.
2. Loiko P.A., et al. // Laser Physics Letters. 2016. V. 13. P. 055803.
3. Yu C., et al. // Journal of non-crystalline solids. 2011. V. 357. P. 2309-2311.
4. Terczynska-Madej A., et al. // Optical Materials. 2011. V. 33. P. 1984-1988.

В.В. ПЕСНЯКОВ, А.И. ИГНАТЬЕВ, Н.В. НИКОНОРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ НАНОСТРУКТУР
Ag-NaBr/AgBr В БРОМИДНЫХ
ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ СТЁКЛАХ,
АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ**

В работе показано, что термообработка бромидных фототерморефрактивных стёкол, активированных ионами иттербия, ведёт к длинноволновому смещению пика плазмонного резонанса серебряной наночастицы с оболочкой NaBr/AgBr до 517 нм, связанному с увеличением показателя преломления оболочки и окружающего её стекла, а также одновременному уменьшению его интенсивности, связанному с уменьшением размера гибридной наноструктуры Ag-NaBr/AgBr.

V.V. PESNYAKOV, A.I. IGNATIEV, N.V. NIKONOROV

ITMO University, Saint-Petersburg

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THERMAL
TREATMENT ON THE FORMATION OF THE HYBRID
NANOSTRUCTURES Ag-NaBr/AgBr IN BROMIDE
PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES DOPED WITH Yb**

It is shown in this work that heat treatment of bromide photo-thermo-refractive glasses doped with ytterbium leads to a red-shift of the plasmon resonance peak of a silver nanoparticle with a NaBr/AgBr shell to 517 nm, associated with an increase in the refractive index of the shell and host glass, as well as a simultaneous a decrease in its intensity associated with a decrease in the size of the Ag-NaBr/AgBr hybrid nanostructure.

Бромидные фототерморефрактивные (ФТР) стёкла – относительно новый класс фоточувствительных сред, в которых под действием излучения и последующей термической обработки происходит изменение показателя преломления за счёт формирования на плазмонных наночастицах серебра нанокристаллов NaBr/AgBr.

В данной работе исследовались оптические свойства бромидных ФТР стёкол, активированных ионами иттербия, следующего состава: $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ с фоточувствительными добавками CeO_2 , Sb_2O_3 , Ag_2O . Количество Yb варьировалось от 0 до 2 мол.%.

У синтезированных образцов измерялась температура стеклования (T_g) методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Исходные образцы стёкол облучались ртутной лампой. Далее образцы обрабатывались в градиентной печи при пяти различных температурах от значений T_g для каждой концентрации Yb (-40, 0, +20, +40 и +60 °C) в течение 10 ч.

На рис. 1 показан график зависимости интенсивности пика плазмонного резонанса (ППР) в зависимости от температуры обработки. Для образцов с 0 и 0,5 мол.% Yb значение коэффициента поглощения в ППР снижается при температурах выше +40 от T_g . На рис. 2 продемонстрирована зависимость положения ППР резонанса в зависимости от температуры для разных концентраций Yb. С увеличением температуры наблюдается линейный длинноволновый сдвиг: 12 нм для Yb = 0 мол.%, 35 нм для Yb = 0,5 мол.% и 45 нм для Yb = 2 мол.%.

Наблюдаемое одновременное длинноволновое смещение и уменьшение поглощения в ППР может быть объяснено уменьшением размера плазмонной наночастицы и одновременным увеличением показателя преломления оболочки и окружающего стекла. На основании работы [1], где рассматривались похожие системы типа $Ag_xNa_{(1-x)}Br$, можно высказать гипотезу, что при высоких температурах большее количество атомов Ag внедряется в оболочку, а не в ядро наночастицы, из чего следует одновременное уменьшение размера наночастиц и увеличение показателя преломления оболочки из-за более высокого его значения у AgBr (2,253) в сравнении с NaBr (1,6428).

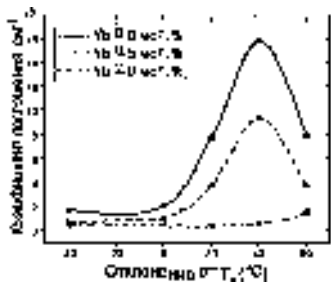


Рис. 1. Зависимость интенсивности пика плазмонного резонанса от температуры

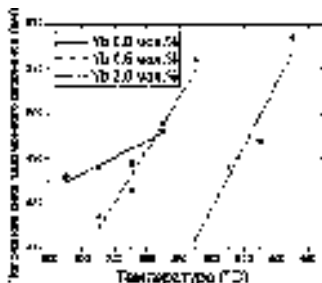


Рис. 2. Зависимость положения пика плазмонного резонанса от температуры

Список литературы

1. Nikonorov N.V., et al. Effect of rare-earth-dopants on Bragg gratings recording in PTR glasses // Proc. SPIE. 2017. V. 10233.

Е.В. КУЛЬПИНА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЛИТИЙ-ЦИНК- ГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛОКЕРАМИК С МАРГАНЦЕМ

Исследована структура литий-цинк-германатных стеклокерамик с марганцем с помощью рамановской спектроскопии. Установлена связь между составом стеклокерамики и формирующимися кристаллическими фазами, а также люминесцентными свойствами ионов марганца.

E.V. KULPINA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

STRUCTURAL STUDIES OF LITHIUM ZINC GERMANATE GLASS-CERAMICS WITH MANGANESE

The structure of lithium-zinc-germanate glass-ceramics with manganese has been studied using Raman spectroscopy. A relationship has been established between the composition of glass-ceramics and the forming crystalline phases, as well as the luminescent properties of manganese ions.

Для структурных исследований стеклокристаллических материалов обычно применяется метод порошковой рентгеновской дифракции. Недостаток данного метода состоит в том, что исследуемый образец необратимо уничтожается. Неразрушающей и не менее эффективной альтернативой для идентификации кристаллических фаз является рамановская спектроскопия.

Литий-цинк-германатные стеклокерамики с марганцем, исследуемые в настоящей работе, были получены путём изотермической обработки стёкол состава $0.1 \text{ MnO}_2 - (30-x) \text{ Li}_2\text{O} - x \text{ ZnO} - 69.9 \text{ GeO}_2$, где $x = 5, 7.5, 10, 15, 20, 22.5$ мол.%. Ранее было показано [1], что стеклокерамики такого состава обладают люминесценцией в красной и зелёной области спектра, соответствующей ионам Mn^{4+} и Mn^{2+} . Целью данной работы является установить связь между структурой стеклокерамик и параметрами люминесценции ионов марганца.

Исследование микроструктуры стеклокерамик выполнялось с помощью спектроскопии рамановского рассеяния. Обнаружено, что в зависимости от содержания оксида лития в составе стекла, в стеклокерамиках формируются различные кристаллические фазы. Так,

для состава, содержащего 7.5 % оксида лития, в спектре рамановского рассеяния (рис. 1) отчётливо доминируют полосы, соответствующие кристаллической фазе GeO_2 [2]. При увеличении содержания оксида лития до 10 % присутствие фазы GeO_2 всё ещё наблюдается, однако в спектре доминируют полосы, соответствующие $\text{Li}_2\text{Ge}_7\text{O}_{15}$ [3]. В спектрах стеклокерамик, содержащих 15 - 25 % оксида лития, преимущественно наблюдаются полосы кристаллической фазы $\text{Li}_2\text{Ge}_4\text{O}_9$ [3]. Помимо этого, с увеличением концентрации оксида лития всё более заметной становится полоса на 815 см^{-1} , которая является наиболее интенсивной для спектров Li_2GeO_3 [4]. Кристаллических фаз, содержащих цинк, не было обнаружено ни в одном составе.

Полученные результаты позволяют предположить, что в исследуемых стеклокерамиках ионы Mn^{4+} занимают эквивалентные позиции Ge^{4+} в кристаллах германатов лития, чем и обусловлена люминесценция в красной области спектра, характерная для Mn^{4+} в сильном кристаллическом поле. Ионы Mn^{2+} , предположительно, не входят в состав кристаллов, а остаются в стекле, занимая позиции ионов Zn^{2+} , которые не участвуют в формировании кристаллических фаз. Таким образом, зелёная люминесценция стеклокерамик может быть связана с двухвалентным марганцем в слабом кристаллическом поле.

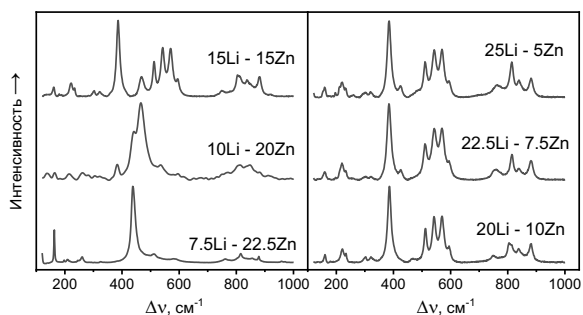


Рис. 1. Спектры рамановского рассеяния литий-цинк-германатных стеклокерамик с марганцем

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (№ 19-72-10036).

Список литературы

1. Babkina A., Kulpina E., et. al. // Proc. SPIE. 2022. V. 12142. P. 121420B.
2. Mernagh T.P., Liu L. // Phys Chem Minerals. 1997. V. 24. P. 7.
3. Furukawa T., White W. // J. Mat. Science. 1980. V. 15. P. 1648.
4. Zhang S., Wan S., et al. // Inorg. Chem. 2019. V. 58 (8). P. 5025.

Е.А. МИХАРЕВ¹, А.Ю. ЛУНЁВ¹, А.И. СИДОРОВ^{1,2}

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ИЗ ФТР-СТЕКЛА С МОЛЕКУЛЯРНЫМИ КЛАСТЕРАМИ СЕРЕБРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Приведены результаты моделирования микрорезонаторов на основе фототерморефрактивного силикатного стекла с молекулярными кластерами серебра в сравнении с ФТР-стеклом. Рассчитаны резонансные частоты и определено влияние градиента показателя преломления вблизи поверхности микросферы на форму моды резонатора. Резонансная частота вблизи пика люминесценции стекла 633 нм составила 473.6 ТГц.

Е.А. MIKHAREV¹, A.Yu. LUNEV¹, A.I. SIDOROV^{1,2}

¹*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

²*ITMO University, Saint-Petersburg*

MATHEMATICAL SIMULATION OF PTR GLASS MICRORESONATORS WITH SILVER MOLECULAR CLUSTERS FOR INVESTIGATION OF LASER GENERATION PROCESSES

The results of simulation of microresonators based on photo-thermo-refractive silicate glass with silver molecular clusters are presented in comparison with PTR glass. The resonant frequencies are calculated and the effect of the refractive index gradient near the microsphere surface on the resonator mode shape is determined. The resonant frequency near the glass luminescence peak at 633 nm was 473.6 THz.

Микрорезонаторы с модами шепчущей галереи (МШГ) – это особый класс оптических резонаторов, которые представляют собой сферические диэлектрические структуры, в которых оптические лучи испытывают полное внутреннее отражение и фокусируются вблизи поверхности резонатора. Малые объёмы мод вместе с высокой добротностью делают их полезными инструментами для нелинейной оптики и сенсорики [1].

Целью работы является моделирование микрорезонатора МШГ на основе фототерморефрактивного стекла с молекулярными кластерами

серебра которые могут быть внесены путём ионного обмена со стеклом [2]. Поскольку существуют только приблизительные значения резонансной частоты, численное моделирование необходимо для понимания поведения и оценки качества.

Проведение ионного обмена со стеклом создаёт градиент показателя преломления на поверхности микросферы, который линейно убывает к центру микросферы как показано на рис. 1в. Было произведено численное моделирование микрорезонатора на основе метода конечных элементов. Были рассчитаны резонансные частоты и форма пространственной моды стеклянной микросферы на оптических частотах.

На рис. 1а и 1б представлены распределения напряжённости электрического поля для фундаментальной моды вблизи пика люминесценции молекулярных кластеров серебра.

По результатам моделирования выявлено что градиент показателя преломления сжимает моду ближе к краю микросферы, что уменьшает объём моды, но также увеличивает потери на излучение.

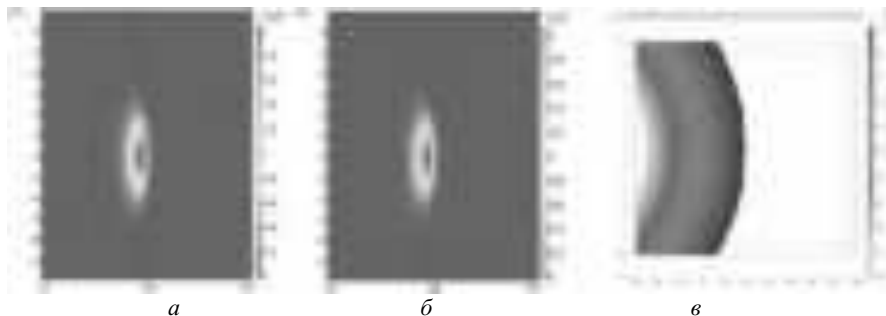


Рис. 1. Результаты моделирования резонатора: микросфера из ФТР-стекла (а), микросфера из ФТР-стекла, легированная по поверхности молекулярных кластеров серебра (б), градиент показателя преломления вблизи поверхности микросферы (в)

Список литературы

1. Chiasera A., et al. Spherical whispering-gallery-mode microresonators // *Laser & Photonics Reviews*. 2010. V. 4. No. 3. P. 457-482.
2. Демичев И.А., Игнатьев А.И., Сгибнев Е.М., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Хрущева Т.А., Шахвердов Т.А. Особенности люминесценции силикатных стекол с серебром, введенным методом ионного обмена // *Оптика и спектроскопия*. 2014. Т. 116. № 4. С. 631-637.

А.Ю. ЛУНЁВ¹, Е.А. МИХАРЕВ¹, А.И. СИДОРОВ^{1,2}

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

²*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСПЕРСИИ В МИРОСФЕРИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ ИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА С НАНОЧАСТИЦАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДОВ

Приведены результаты численного моделирования дисперсии в микрорезонаторе из силикатного стекла легированного наночастицами CuS. Продемонстрировано влияние наночастиц на дисперсию микрорезонатора в ближней ИК-области.

A. Yu. LUNEV¹, E. A. MIKHAREV¹, A. I. SIDOROV^{1,2}

¹*Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»*

²*ITMO University, Saint-Petersburg*

NUMERICAL SIMULATION OF DISPERSION IN A SILICATE GLASS SPHERICAL CAVITY WITH SEMICONDUCTOR OXIDE NANOPARTICLES

The results of numerical simulation of dispersion in a microresonator made of silicate glass doped with CuS nanoparticles are presented. The effect of nanoparticles on the microresonator dispersion in the near-IR region is demonstrated.

Небольшой объём моды и высокая добротность микрорезонаторов обеспечивают эффективность фотонного взаимодействия, важные для широкого спектра задач в науке и технике. Резонаторы, поддерживающие моды шепчущей галереи, имеют самые высокие оптические характеристики среди всех других типов микрорезонаторов. Точная настройка частот мод резонатора может значительно повысить эффективность оптических взаимодействий [1]. С помощью численного моделирования показано, что дисперсией резонатора можно управлять путём введения в стекло наночастиц CuS. Продемонстрированный подход обеспечивает гибкость проектирования дисперсии в любом резонаторе с осевой симметрией, который может поддерживать моды шепчущей галереи.

Целью работы является численное моделирование микросферического резонатора, и расчёт его дисперсии.

Влияние наночастиц CuS на показатель преломления силикатного стекла было найден с использованием соотношения Крамерса-Кронига на основании спектров поглощения наночастиц [2]. Моделирование дисперсии микрорезонатора проводилось методом конечных элементов. На рис. 1а приведено расчётное распределение напряжённости электрического поля для фундаментальной ТЕ-моды на длине волны 1550 нм. На рис. 1б представлены результаты расчётов дисперсии микрорезонатора из чистого силикатного стекла и с добавлением 1 масс% наночастиц CuS. На рис. 1в представлены результаты расчёта ширины межродового интервала резонансных частот для резонатора с наночастицами.

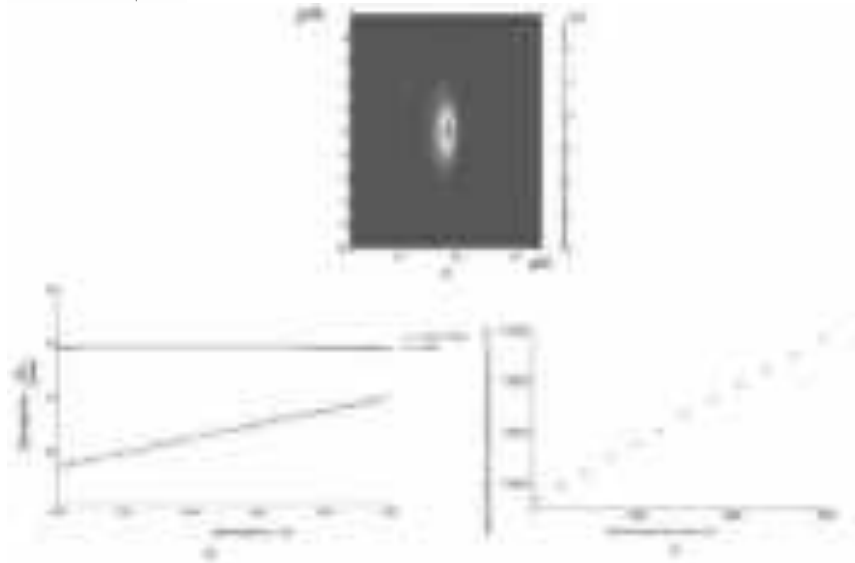


Рис. 1. Результаты моделирования резонатора: распределение напряжённости электрического поля резонатора для фундаментальной моды на длине волны 1550 нм (а), дисперсия резонатора (б), ширина межродового интервала резонансных частот (в)

Список литературы

1. Xie Y., et al. Metallic-like stoichiometric copper sulfide nanocrystals: phase-and shape-selective synthesis, near-infrared surface plasmon resonance properties, and their modeling // ACS nano. 2013. V. 7. No. 8. P. 7352-7369.

Э.А. ИЗБАСАРОВА¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}¹Казанский (Приволжский) федеральный университет²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ОПТИЧЕСКИЙ НАГРЕВ КРЕМНИЕВЫХ АСМ-КАНТИЛЕВЕРОВ

В данной работе мы исследуем оптический нагрев кремниевого АСМ-кантилевера, который взаимодействует со стеклянной и золотой подложками. Температура кончика зонда кантилевера определялась с помощью термометрии комбинационного рассеяния света. В данной работе показано, что острие кремниевого зонда разогревается до 1200 К при его освещении лазерным светом с интенсивностью 5 МВт/см² на длине волны 633 нм. Это аномальное поглощение света связано с возбуждением локализованного плазмонного резонанса на кончике нанопластины.

E.A. IZBASAROVA¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}¹Kazan (Volga Region) Federal University²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

OPTICAL HEATING OF SILICON AFM CANTILEVERS

In this paper, we investigate the optical heating of a silicon AFM cantilever that interacts with glass and gold substrates. The temperature of the tip of the cantilever probe was determined using Raman thermometry. In this paper, it is shown that the tip of a silicon probe heats up to 1200 K when it is illuminated by laser light with an intensity of 5 MW/cm² at a wavelength of 633 nm. This abnormal absorption of light is associated with the excitation of localized plasmon resonance at the tip of the nanoantenna.

В последнее время большую актуальность приобретает развитие методов термонанопластики, которые позволяют реализовывать высокоэффективный оптический нагрев наноструктур, а также измерять их температуру. Подобные технологии используются в широком спектре прикладных задач: фототермическая терапия рака [1], детектирование локальных фазовых переходов [2], термо-ассистируемая магнитная запись информации [3], биомедицина и аналоговые вычисления [4]. Одной из ключевых проблем является усиление эффективности фототермического преобразования и пространственной локализации тепла.

Настоящая работа посвящена разработке механизмов локального фотонагрева и контроля температуры в режиме реального времени. Для этих целей исследуется оптический нагрев кончиков кремниевых кантилеверов, которые широко используются в атомно силовой зондовой микроскопии. На рис. 1 изображена схема экспериментальной установки.

Экспериментальная система рамановского микроскопа состоит из конфокального рамановского спектрометра. Кончик кремниевого АСМ кантилевера расположен под фокальным пятном лазерного луча рамановского спектрометра и находится в полуконтакте с подложкой. В первом эксперименте использовалась стеклянная подложка, а во втором золотая, толщиной 50 нм. Измерения проводились на воздухе. Для исследования эффекта нагрева кончик кантилевера освещаем различной мощностью лазера, линейно увеличивая её со временем, достигая значения 16 мВт, что соответствует интенсивностям накачки до значения 5 МВт/см^2 соответственно в фокальном пятне.

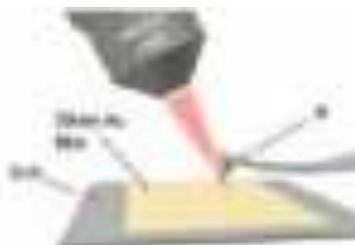


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для анализа механизмов такого аномального фотонагрева в работе выполнено численное моделирование. Первый шаг заключался в расчёте поглощённой мощности и исследовании электромагнитных мод, возбуждаемых в кончике зонда, с помощью метода конечных разностей во временной области (FDTD). Далее численно решалось уравнение тепловой диффузии для расчёта температуры нагрева зонда методом конечных элементов (FEM). Теоретически показано, что острие кремниевого зонда разогревается до 1200 К при его освещении лазерным светом с интенсивностью 5 МВт/см^2 на длине волны 633 нм. Это аномальное поглощение света связано с возбуждением локализованного плазмонного резонанса на кончике наноантенны. В этой работе повышение температуры кончика кремниевого АСМ-кантилевера при сфокусированном на нём лазерном излучении измерялось с помощью термометрии комбинационного рассеяния света. Экспериментально доказано с помощью изменения фазы колебаний кантилевера, появления сдвига рамановских линий и сканирующей электронной микроскопии, что происходит гигантский нагрев кремниевого зонда. В будущем полученные результаты будут использованы для разработки методов детектирования фазовых переходов в сильно неоднородных материалах с нанометровым пространственным разрешением.

Список литературы

1. Bucharskaya A., et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2016. V. 17 (8). P. 1295.
2. Vasudevan R.K., et al. // *Advanced Functional Materials.* 2016. V. 26 (4). P. 478-486.
3. Okamoto S., et al. // *J. of Phys. D Appl. Phys.* 2015. V. 48 (35). P. 353001.
4. Li Y., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115 (19). P. 195503.

А.В. ГОРБАТОВА, А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

**ГЕТЕРОСТРУКТУРА Co/ДПМ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО
СПИНТРОННОГО ЭМИТТЕРА: АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКОГО
ПОГЛОЩЕНИЯ В ФЕРРОМАГНИТНОМ СЛОЕ
ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕРАГЕРЦОВОЙ ЭМИССИИ**

В данной работе рассмотрены гетероструктуры на основе наноразмерных слоёв кобальта и дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), перспективные для создания спинтронных терагерцовых (ТГц) эмиттеров. Произведена оценка спектрального поглощения для каждого слоя рассматриваемых структур с учётом материала полупроводникового слоя и типа подложки. Определены оптимальные условия для достижения эффективной генерации спин-поляризованного тока и ТГц-излучения.

A.V. GORBATOVA, A.M. BURYAKOV, E.D. MISHINA
MIREA – Russian Technological University, Moscow

**Co/TMD HETEROSTRUCTURE FOR THz SPINTRONIC
EMITTER: ANALYSIS OF OPTICAL ABSORPTION
IN A FERROMAGNETIC LAYER
FOR EFFECTIVE THz EMISSION**

In this work, we consider heterostructures based on nanoscale layers of cobalt and transition metal dichalcogenides (TMDs), which are promising for spintronic THz emitters. The spectral absorption was estimated for each layer of the structure, taking into account the material of the semiconductor layer and the type of the substrate. Optimal conditions for efficient generation of spin-polarized current and THz emission are determined.

Недавний прогресс в области спинтроники и ферромагнетизма привёл к возможности генерации переходных токов в металлах за счёт преобразования спинового тока в ток зарядов [1]. В связи с этим перспективным подходом для характеристики материалов спинтроники является эмиссионная терагерцовая спектроскопия [2]. Облучая гетероструктуры ферромагнитных (ФМ)/немагнитных металлов фемтосекундными лазерными импульсами, можно получать импульсы с частотой в терагерцовом (ТГц) диапазоне за счёт обратного спинового эффекта Холла [1]. Также недавно была обнаружена генерация сильного

спин-поляризованного тока в гетероструктуре кобальта и двумерного полупроводникового ДПМ – MoS_2 [3]. Слой ДПМ при этом выполняет функцию фильтра поляризованных по спину высокоэнергичных электронов, способствуя более эффективной ТГц-эмиссии. Фундаментальный интерес представляет исследование механизмов ТГц-генерации в подобных структурах.

Если рассматривать гетероструктуру ФМ/полупроводник как спинтронный ТГц-эмиттер, то для эффективной ТГц-генерации необходимо, чтобы поглощение в ФМ значительно превышало поглощение в полупроводнике. В этом случае будет выполняться условие возникновения спин-поляризованного тока. В данной работе в программном пакете COMSOL Multiphysics рассчитано распределение электромагнитного излучения оптического диапазона длин волн в структурах $\text{Co}(3 \text{ нм})/\text{ДПМ}$. Толщина 3-нм плёнки кобальта обеспечивает наиболее эффективную ТГц-генерацию [1]. Произведена оценка поглощения в слоях кобальта и ДПМ в зависимости от материала полупроводникового слоя (WSe_2 , WS_2 , MoSe_2 , MoS_2) и типа подложки. Определён оптимальный диапазон длин волн возбуждающего излучения для эффективной работы ТГц-излучателей. Проанализировано влияние интерференционных эффектов в подложках SiO_2/Si в зависимости от толщины оксида на поглощение кобальтом оптического излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-10353) и РТУ МИРЭА (грант «Для молодых ученых», НИЧ-56).

Список литературы

1. Seifert T., et al. // Nature Photonics. 2016. V. 10. No. 7. P. 483-488.
2. Seifert T., et al. // Spin. 2017. V. 7. No. 3. P. 1740010.
3. Cheng L., et al. // Nature Physics. 2019. V. 15. No. 4. P. 347-351.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ, С.М. ДЗЯДУХ, Д.И. ГОРН,
Н.Н. МИХАЙЛОВ¹, С.А. ДВОРЕЦКИЙ¹, Р.В. МЕНЬШИКОВ¹,
Г.Ю. СИДОРОВ¹, И.Н. УЖАКОВ¹, М.В. ЯКУШЕВ¹

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
¹Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск*

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИПОЛЯРНЫХ NBN-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ HgCdTe СО СВЕРХРЕШЁТКОЙ В БАРЬЕРНОЙ ОБЛАСТИ

Приведены результаты экспериментальных исследований темновых характеристик инфракрасных n^+Bn -детекторов на основе HgCdTe со сверхрешёткой в барьерной области. Проанализированы вклады объёмной и поверхностной компонент темнового тока структур при различных температурах. Определены их энергии активации энергетических уровней обнаруженных в запрещённой зоне полупроводника.

A. V. VOITSEKHOVSKII, S. M. DZYADUKH, D. I. GORN,
N. N. MIKHAILOV¹, S. A. DVORETSKY¹, R. V. MENSHIKOV¹,
G. Yu. SIDOROV¹, I. N. UZHAKOV¹, M. V. YAKUSHEV¹

*National Research Tomsk State University
¹Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS, Novosibirsk*

ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF UNIPOLAR NBN STRUCTURES BASED ON HgCdTe WITH A SUPERLATTICE IN THE BARRIER REGION

The results of experimental studies of the dark characteristics of infrared n^+Bn detectors based on HgCdTe with a superlattice in the barrier region are presented. The contributions of the bulk and surface components of the dark current of the structures at different temperatures are analyzed. Their activation energies of the energy levels found in the semiconductor band gap are determined.

Благодаря своим фундаментальным свойствам твёрдый раствор $Hg_{1-x}Cd_xTe$ является одним из основных материалов для создания высокочувствительных детекторов инфракрасного диапазона в окнах прозрачности атмосферы 3 - 5 мкм и 8 - 12 мкм. Однако, данные фотонные детекторы для своей работы требуют пониженных рабочих температур, кроме того, в процессе изготовления фотодиодов применяются дефектообразующие операции ионной имплантации и последующего

высокотемпературного отжига. Создание униполярных барьерных структур позволяет повысить рабочую температуру детекторов и даёт технологические преимущества [1]. В литературе редко встречаются результаты экспериментальных исследований подобных структур, но публикуемые результаты показывают необходимость проведения дальнейших исследований и усовершенствования технологического цикла изготовления [2 - 4]. Создание высокоэффективного n^+Vn детектора на основе $HgCdTe$ является сложной задачей, поскольку на границах между барьерным слоем и слоями n -типа имеется потенциальный барьер для неосновных носителей, препятствующий их свободному потоку. Расчёты показывают, что созданием барьерной структурой на основе сверхрешётки $CdTe-HgTe$, можно минимизировать барьер для неосновных носителей [5].

Для проведения исследований на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ были изготовлены тестовые n^+Vn и МДП на n^+Vn структуры со сверхрешёткой в барьерной области. Содержание Cd в контактном и поглощающем слоях составило величину $x = 0.32$. В процессе роста контактного слоя производилось дополнительное легирование его индием. Сверхрешётка в барьерном слое представляла чередующиеся между собой барьеры ($x = 0.75$) и ямы ($x = 0.04$) с толщинами 2.5 нм и 10 нм, соответственно. На пластинах изготавливались отдельные детекторы различных площадей по «меза» технологии. Пассивация боковых поверхностей и создание функционального диэлектрического слоя для МДП проводилось методом атомно-слоевого осаждения Al_2O_3 .

В широком диапазоне условий по температуре проведены исследования зависимостей от напряжения смещения темновых токов n^+Vn структур со сверхрешёткой в барьерной области. По измерениям на структурах различной площади проанализированы вклады объёмной и поверхностной компонент темнового тока структур при различных температурах. В результате исследования структур обнаружены энергетические уровни в запрещённой зоне полупроводника, определены их энергии активации.

Исследование выполнено при поддержке Программы развития ТГУ («Приоритет-2030»).

Список литературы

1. Voitsekhovskii A.V., et al. // J. Electron. Mater. 2021. V. 50.
2. Voitsekhovskii A.V., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53.
3. Voitsekhovskii A.V., et al. // J. Infrared Phys. and Tech. 2019. V. 102.
4. Itsuno A.M., Phillips J.D., Velicu S. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100.
5. Akhavan N.D., et al. //, IEEE Trans. Electron. Dev. 2016. V. 63.

В.М. ЛЕВКОВСКАЯ¹, А.В. ХАРИТОНОВ¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

²*Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

ТЕРМОМЕТРИЯ НЕОДНОРОДНО НАГРЕТЫХ НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА

Локальный оптический нагрев наноструктур необходим во многих областях, таких как биомедицина, фотокатализ, термофотовольтаика. Однако существует ограничение, препятствующее использованию эффекта нагрева частиц на наномасштабе. Оно связано с проблемой измерения средней температуры неоднородно нагретой наноструктуры. Данная работа посвящена развитию методов измерения температуры нагрева пространственно-ограниченных структур. Показано, что ошибка в определении средней температуры зависит от градиента температуры фотонагрева

V.M. LEVKOVSKAYA¹, A.V. KHARITONOV¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹*Kazan (Volga Region) Federal University*

²*Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

THERMOMETRY OF NONUNIFORMLY HEATED NANOSTRUCTURES BASED ON RAMAN SPECTROSCOPY

Local optical heating of nanostructures plays a crucial role in many fields, such as biomedicine, photocatalysis, and thermophotovoltaics. However, there is a problem of measuring the average temperature of an inhomogeneously heated nanostructure. This limitation prevents the use of nanosized optical heaters. In this work we develop a method for measuring the heating temperature of nanostructures. It is shown that the error in determining the average temperature depends on the gradient of photoheating temperature.

Наночастицы способны разогреваться до высоких температур под действием электромагнитного излучения [1], следовательно, они могут выступать в роли локальных источников тепла. Однако нагрев наноструктур не является технологически сложной задачей. Основная проблема при использовании таких наноисточников тепла заключается в точном определении их температуры.

В настоящей работе температура наноструктур оценивается по сдвигу линии комбинационного рассеяния света (КР) [2]. Наноструктура представляет собой кремниевый наноцилиндр Si, на вершине которого

расположена плазмонная частица нитрида титана TiN ($200 \times 200 \times 50$ нм). Интенсивность линии плазмонного TiN достаточно мала и пик сильно уширяется при фотонагреве частицы, что приводит к неточным измерениям температуры, поэтому определение температуры осуществляется по сдвигу линии КР кремния.

Когда исследуемый образец нагрет равномерно по всему объёму, в спектре комбинационного рассеяния (КР) наблюдается одна линия. Напротив, в наноструктурах, разогретых под действием сфокусированного лазерного излучения, возникает гигантский градиент температур, что приводит к появлению линии горячего кремния (рис. 1). Зачастую при измерении температуры неоднородно нагретого вещества наибольший интерес представляет средняя температура изучаемого объекта. В некоторых исследованиях принято считать, что положение второй линии отвечает за среднюю температуру наноструктуры, при этом не учитывается, что спектральный контур состоит из множества элементарных контуров. При рассмотрении модельной задачи (рис. 2) было обнаружено, что положение пика для средней температуры отличается от положения пика огибающей всех элементарных контуров. Разница между ними увеличивается по мере роста градиента температур в наноструктуре. Это означает, что экспериментальная температура занижена по сравнению с истинной температурой.

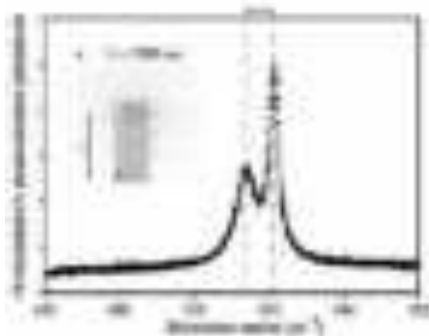


Рис. 1. Спектр КР для наноцилиндра с высотой $h = 700$ нм, интенсивность лазерного излучения $I = 5$ МВт/см²

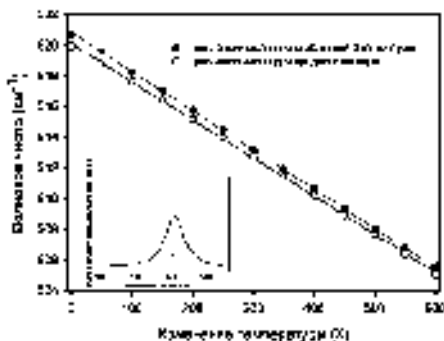


Рис. 2. Сравнение положений пиков двух контуров

Список литературы

1. Baffou G, Quidant R. //World scientific handbook of metamaterials and plasmonics. 2018. P. 379–407.
2. Kharintsev S.S., Kharitonov A.V., et al. // Nanoscale 2022. V. 14. P. 12117.

Е.Д. ЛЕБЕДЕВА, А.М. БУРЯКОВ, П.Ю. АВДЕЕВ,
А.В. ГОРБАТОВА

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СТРУКТУРАХ Co/WSe₂ И Co/IrMn₃

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования генерации терагерцового излучения (ТГц) спинтронными эмиттерами Co/WSe₂ и Co/IrMn₃. Приведены временные зависимости амплитуды ТГц-излучения, их частотные спектры и магнитные петли гистерезиса ТГц-амплитуды. Представлено сравнение эффективности генерации ТГц-сигнала в новых спинтронных эмиттерах Co/WSe₂ и Co/IrMn₃.

E.D. LEBEDEVA, A.M. BURYAKOV, P.Yu. AVDEEV,
A.V. GORBATOVA

MIREA – Russian Technological University, Moscow

INVESTIGATION OF THz RADIATION PARAMETERS IN Co/WSe₂ AND Co/IrMn₃ STRUCTURES

This paper presents the results of an experimental study of the generation of terahertz radiation by spintronic emitters Co/WSe₂ and Co/IrMn₃. The time dependences of the amplitude of terahertz (THz) radiation, their frequency spectra and magnetic hysteresis loops of THz amplitude are given. A comparison of the efficiency of THz signal generation in new spintronic Co/WSe₂ and Co/IrMn₃ emitters is presented.

Среди различных типов терагерцовых (ТГц) излучателей, использующих различные физические эффекты, спинтронные излучатели обладают множеством преимуществ, такими как: широкая полоса пропускания, высокая эффективность генерации ТГц-излучения, простота управления параметрами излучения, в том числе поляризацией и амплитудой [1, 2]. Такие преимущества позволяют использовать спинтронные излучатели в различных устройствах, используемых в областях медицины, науки и безопасности.

В данной работе исследовались плёнки Co/WSe_2 и Co/IrMn_3 на сапфировой подложке. Эффективность генерации ТГц-излучения с поверхности экспериментальных образцов была исследована стандартной методикой терагерцовой спектроскопии с временным разрешением в геометрии на пропускание. В качестве луча накачки использовалось оптическое импульсное излучение с длиной волны 800 нм.

В ходе эксперимента были получены зависимости амплитуды ТГц-излучения от времени задержки между лучами накачки и зондирования, оценена эффективность генерации ТГц-излучения. Из временных форм ТГц-сигналов методом Фурье-преобразования получены их частотные спектры с шириной ~ 3 ТГц. Исследована зависимость генерации ТГц-излучения от внешнего магнитного поля. Получены петли ТГц-гистерезиса, свидетельствующие о повороте ТГц-поляризации

Работа выполнена при поддержке РФФ № 21-79-10353.

Список литературы

1. Hibberd M.T., et al. //Applied Physics Letters. 2019. V. 114. No. 3. P. 031101.
2. Papaioannou E.T., Beigang R. //Nanophotonics. 2021. V. 10. No. 4. P. 1243-1257.

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО, Ф.Ю. МУШИН

Оренбургский государственный университет

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОДНОМЕРНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛАЗМОНОВ С ОРГАНИЧЕСКИМИ МОЛЕКУЛАМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕРДЕЧНИКА НАНОПРОВОЛОКИ

Теоретически исследовано взаимодействие одномерных осесимметричных поверхностных плазмонов металлической оболочки цилиндрической нанопроволоки с электронными возбуждениями молекул органического люминофора, находящихся в её диэлектрическом сердечнике. Показано, что взаимодействие является слабым, его интенсивность увеличивается с ростом радиуса сердечника, и при высоких концентрациях молекул расщепление Раби не превосходит 50 мэВ.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO, F.Yu. MUSHIN

Orenburg State University

INTERACTION OF ONE-DIMENSIONAL SURFACE PLASMONS WITH ORGANIC MOLECULES OF THE DIELECTRIC CORE OF NANOWIRE

The interaction of one-dimensional axisymmetric surface plasmons of the metal shell of a cylindrical nanowire with electronic excitations of organic luminophore molecules located in its dielectric core is theoretically investigated. It is shown that the interaction is weak, its intensity increases with an increase in the radius of the core, and at high concentrations of molecules the Rabi splitting does not exceed 50 MeV.

В данной работе рассмотрено взаимодействие электронных возбуждений молекул органического красителя, находящихся в диэлектрическом сердечнике нанопроволоки круглого сечения, с одномерными осесимметричными поверхностными плазмонами металлической оболочки. Наличие в оболочечной нанопроволоке двух границ металла с диэлектриком приводит к возникновению двух типов поверхностных плазмонов: низко- и высокочастотных. В рамках квазистатического приближения в случае, когда металл описывается моделью Друде, были получены аналитические выражения для законов дисперсии этих плазмонов.

На рис. 1 изображены дисперсионные кривые $\omega(k)$ осесимметричных поверхностных плазмонов для разных значений радиуса R_1 сердечника нанопроволоки с серебряной оболочкой с внешним радиусом 10 нм. С

уменьшением R_1 дисперсионные кривые низкочастотного плазмона становятся более круглыми и приближаются к кривой 1, соответствующей плазмонным колебаниям в однородной нанопроволоке. Горизонтальная прямая, пересекающая дисперсионные кривые низкочастотного плазмона, отвечает частоте электронного перехода ω_f в молекуле красителя.

Интенсивность взаимодействия молекулы с плазмонном характеризуется расщеплением Раби, равным $2\sqrt{\sum |V_i(k_0)|^2}$, где матричный элемент V_i оператора взаимодействия i -ой молекулы с электрическим полем плазмона вычисляется при значении волнового числа k_0 , которое обеспечивает равенство энергий низкочастотного плазмона и возбуждённой молекулы [1]. В данной работе для расщепления Раби получено выражение

$$\Delta^2 = \frac{16\pi\hbar\omega(k_0)nd_{fi}^2R_1}{3k_0S(k_0)} I_0(k_0R_1)I_1(k_0R_1),$$

где d_{fi} – дипольный момент перехода в молекуле, $S(k_0)$ – площадь локализации плазмонной моды, $I_n(x)$ – модифицированная функция Бесселя n -го порядка, n – концентрация молекул.

Как следует из рис. 2, с ростом радиуса сердечника нанопроволоки расщепление Раби увеличивается, но даже при высоких концентрациях молекул плазмон-экситонное взаимодействие остается слабым.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, проект № FSGU-2020-0003.

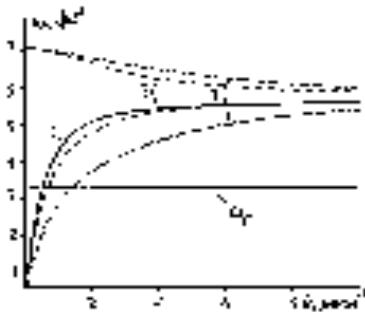


Рис. 1. Законы дисперсии осесимметричных поверхностных плазмонов в нанопроволоке с внутренним сердечником радиуса $R_1 = 0$ (1), 5 (2), 8 (3) нм

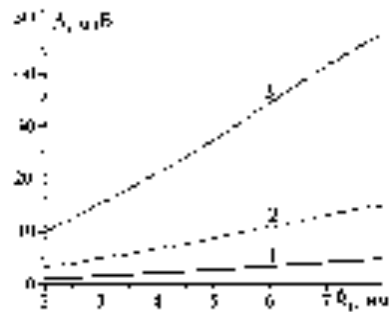


Рис. 2. Зависимость расщепления Раби от радиуса сердечника нанопроволоки при разных концентрациях молекул $n = 10^{18}$ (1), 10^{19} (2), 10^{20} (3) см^{-3}

Список литературы

1. Чмерева Т.М., Кучеренко М.Г., Кислов Д.А., Налбандян В.М. // Опт. и спектр. 2018. Т. 125. С. 670.

А.И. МАЙДЫКОВСКИЙ, Е.А. МАМОНОВ, В.Б. НОВИКОВ,
Т.В. МУРЗИНА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

КАРТИРОВАНИЕ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ФЕРРИТ-ГРАНАТА МЕТОДОМ МИКРОСКОПИИ ОПТИЧЕСКОЙ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ

Приведены результаты экспериментального исследования магнитной доменной структуры приповерхностного слоя феррит-граната с использованием метода микроскопии оптической второй гармоники. Показано, что поверх объёмных полосовых доменов расположена периодическая структура замыкающих доменов с преимущественной ориентацией намагничённости в плоскости поверхности.

A.I. MAYDYKOVSKIY, E.A. MAMONOV, V.B. NOVIKOV,
T.V. MURZINA

Lomonosov Moscow State University

MAPPING OF THE DOMAIN STRUCTURE OF THE SUBSURFACE LAYER OF IRON-GARNET BY OPTICAL SECOND HARMONIC GENERATION MICROSCOPY

The results of an experimental study of the magnetic domain structure of the subsurface layer of iron garnet films by optical second harmonic microscopy are presented. It is shown that a periodic structure of closure domains is located on top of the bulk stripe domains with the predominant orientation of the magnetization in the surface plane.

Доменная структура кристаллических плёнок феррит-граната (ФГ) является классическим объектом исследования [1]. Известно, что помимо объёмных доменов вблизи поверхности ферромагнитных структур могут возникать так называемые замыкающие домены, структура которых изучена недостаточно. Это связано в том числе с ограниченным числом экспериментальных методов, способных выделить структуру поверхности магнитного диэлектрика на фоне объёмной. В данном аспекте перспективным является метод микроскопии оптической второй гармоники (ВГ), который при жесткой фокусировке лазерного излучения обеспечивает субмикронное разрешение в плоскости поверхности структуры. Цель данной работы состояла в экспериментальном

исследовании магнитной структуры приповерхностного слоя ФГ методом микроскопии ВГ.

Исследована эпитаксиальная плёнка $(\text{BiLu})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ на подложке $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (111). Фокусировка излучения титан-сапфирового лазера с длиной волны 850 нм на поверхность плёнки осуществлялась с помощью объектива Mitutoyo M Plan Apo 100 \times (NA = 0.7) в пятно с диаметром менее 1 мкм, излучение ВГ выделялось системой фильтров и регистрировалось с помощью ФЭУ. На рис. 1 приведены сканы интенсивности ВГ для параллельных и ортогональных поляризаций накачки и ВГ (указаны стрелками), причём плоскость поляризации накачки параллельна доменам. Видно распределение интенсивности ВГ с периодом около 4 мкм, соответствующее полосовым объёмным доменам, а также модуляции отклика ВГ вдоль них с периодом около 1.5 мкм. Второй тип структуры соответствует, по-видимому, поверхностным замыкающим магнитным доменам ФГ. Отметим, что светлые и тёмные поверхностные домены, расположенные над соседними полосовыми, смещены на половину периода друг относительно друга. Анализ симметрии отклика ВГ показывает, что средняя намагниченность в них имеет как латеральную, так и нормальную к поверхности плёнки составляющие.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 19-72-20103.

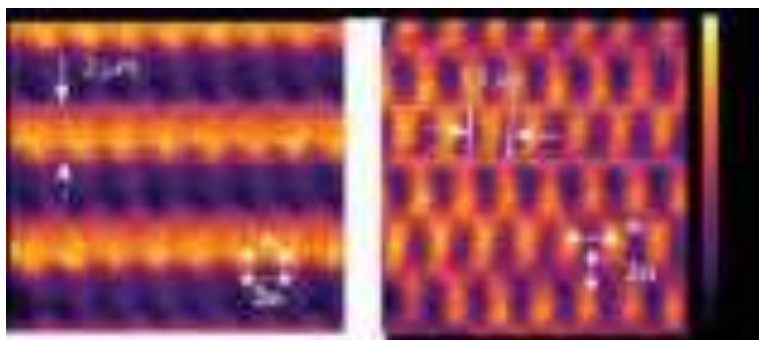


Рис. 1. Карты распределения интенсивности ВГ для параллельных (слева) и перпендикулярных (справа) поляризаций излучения накачки и ВГ

Список литературы

1. Hubert A., Schafer R. Magnetic domains. The analysis of magnetic microstructures. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.

Н.Ю. КРУЧИНИН, М.Г. КУЧЕРЕНКО
Оренбургский государственный университет

**КОНФОРМАЦИИ ОДНОРОДНО ЗАРЯЖЕННЫХ
ПОЛИПЕПТИДОВ НА ПОВЕРХНОСТИ
ПОЛЯРИЗОВАННОГО СПЛЮСНУТОГО
ПЛАЗМОННОГО НАНОСФЕРОИДА**

С использованием молекулярно-динамического моделирования были исследованы конформационные изменения однородно заряженных полипептидов на поверхности сплюснутой сферoidalной золотой наночастицы, находящейся как в статическом, так и переменном электрическом поле. Получены математические модели формирования конформаций полиэлектролита на поверхности сплюснутого проводящего наносфероида во внешнем электрическом поле.

N.Yu. KRUCHININ, M.G. KUCHERENKO
Orenburg State University

**CONFORMATIONS OF UNIFORMLY CHARGED
POLYPEPTIDES ON THE SURFACE OF A POLARIZED
OBLATE PLASMONIC NANOSPHEROID**

Using molecular dynamics simulation, the conformational changes of uniformly charged polypeptides on the surface of an oblate spheroidal gold nanoparticle, which are in both static and alternating electric fields, were studied. Mathematical models are obtained for the formation of polyelectrolyte conformations on the surface of an oblate conducting nanospheroid in an external electric field.

При молекулярно-динамическом моделировании (МД) на поверхности поляризованного вдоль оси вращения сплюснутого золотого наносфероида звенья однородно заряженного полипептида адсорбировались в противоположно заряженной области наночастицы (рис. 1а). При этом звенья макроцепи в основном находились вблизи экватора, и их количество снижалось при приближении к полюсу [1]. На поверхности противоположно заряженной сплюснутой сферoidalной золотой наночастицы, находящейся во внешнем переменном электрическом поле (рис. 1б), вектор напряжённости которого изменялся вдоль оси вращения наночастицы, при низкой температуре около экватора образовывалась узкая опоясывающая полиэлектролитная опушка,

плотность которой увеличивалась при увеличении полного заряда наносфероида и количества заряженных звеньев в макроцепи. При высокой температуре моделирования при переполяризации происходило смещение опоясывающей опушки вдоль оси вращения наносфероида около экватора, а амплитуда таких колебаний была тем выше, чем меньше был полный заряд наночастицы и больше доля заряженных звеньев в полиэлектролите.

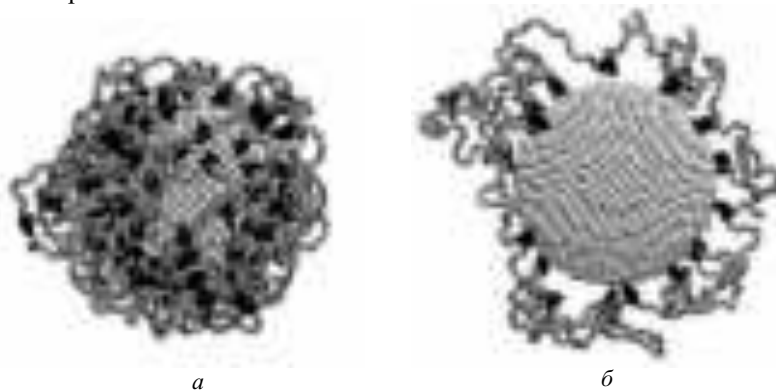


Рис. 1. Конформации однородно заряженного полипептида на поверхности сплюснутого золотого наносфероида (вид вдоль оси вращения), полученные по результатам МД-моделирования на наносфероида в статическом (*a*) и переменном электрическом поле (*б*), на рисунке серая трубка – звенья Ala, чёрным цветом изображены звенья Asp

Получены математические модели формирования конформаций полиэлектролита, адсорбированного на сплюснутом проводящем наносфероида, поляризующемся как во внешнем статическом, так и гармонически изменяющемся электрическом поле с частотой много меньшей плазменной частоты металла [1 - 3].

Результаты могут найти применение при создании и улучшении характеристик сенсоров и нанозондов, работа которых основана на эффекте гигантского комбинационного рассеяния, а также в других устройствах наноэлектроники.

Список литературы

1. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г., Неясов П.П. // Журнал физической химии. 2022. Т. 96. № 12. С. 1785-1796.
2. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Коллоидный журнал. 2022. Т. 84. № 2. С. 171-185.
3. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. № 6. С. 485-496.

П.Ю. АВДЕЕВ, А.В. ГОРБАТОВА, Н.В. БЕЗВИКОННЫЙ,
Е.Д. ЛЕБЕДЕВА, С.В. ОВЧАРЕНКО, А.М. БУРЯКОВ
МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

ВЛИЯНИЕ ИНТЕРФЕЙСА ГИБРИДНОГО СПИНТРОННОГО ЭМИТТЕРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Экспериментально исследована эффективность генерации терагерцового (ТГц) излучения гибридными спинтронными эмиттерами Co/WSe_2 и Co/MoSe_2 . Описано влияние монослоя дихалькогенида переходного металла (ДПМ) на ТГц-генерацию исследуемыми структурами. Оценено влияние длины волны возбуждающего лазерного излучения на эффективность генерации ТГц.

P.Yu. AVDEEV, A.V. GORBATOVA, N.V. BEZVIKONNYI,
E.D. LEBEDEVA, S.V. OVCHARENKO, A.M. BURYAKOV
MIREA – Russian Technological University, Moscow

THE EFFECT OF THE HYBRID SPINTRONIC EMITTER INTERFACE ON THE EFFICIENCY OF THz RADIATION GENERATION

The efficiency of terahertz (THz) radiation generation by hybrid spintronic emitters Co/WSe_2 and Co/MoSe_2 has been experimentally investigated. The effect of a transition metal dichalcogenide (TMD) monolayer on the generation of THz by the studied structures is described. The effect of the wavelength of exciting laser radiation on the efficiency of THz generation is estimated.

Терагерцовый (ТГц) частотный диапазон (0,1 - 30 ТГц) на сегодняшний день является наиболее изучаемым и перспективным для применения во многих областях человеческой деятельности [1]. Исследования последнего десятилетия продемонстрировали такой тип ТГц-излучателей, как спинтронные эмиттеры [2 - 4]. Принцип их работы основан на спиновых эффектах (обратный спиновый эффект Холла, сверхбыстрое размагничивание и др.), что позволяет при помощи магнитного воздействия управлять свойствами генерируемого ими ТГц-излучения [5]. В статье [6] было продемонстрировано увеличение эффективности гибридных спинтронных эмиттеров на основе структуры ферромагнитный металл (ФМ)/дихалькогенид переходного металла (ДПМ). В нашей работе мы продолжаем исследование подобных структур

и рассмотрим влияние типа ДПМ на эффективность генерации терагерцового излучения.

В данной работе исследовались гибридные спинтронные эмиттеры $\text{Co}/\text{WSe}_2(\text{MoSe}_2)$. Монослойные плёнки ДПМ выращены методом осаждения из газовой фазы на подложках Al_2O_3 . Плёнка кобальта толщиной 3 нм методом магнетронного распыления была нанесена на поверхность плёнок ДПМ. Для усиления спиновой ТГц-генерации на Co была нанесена антиферромагнитная плёнка IrMn толщиной 5 нм, покрытая защитным слоем SiO_2 . Исследование проводилось методом терагерцовой спектроскопии временного разрешения (THz-TDS) в геометрии на прохождение, методика которой подробно описана в работе [5]. В ходе эксперимента были получены временные профили ТГц-сигналов, на основе которых при помощи фурье-преобразования получены частотные спектры. Из временных профилей установлено влияние конкретного типа ДПМ и самого монослоя в целом на величину индуцированного ТГц-сигнала.

При помощи программного пакета COMSOL Multiphysics было проведено моделирование поглощения исследуемыми структурами лазерного излучения на разных длинах волн. Полученные результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при накачке рассматриваемых в работе гибридных спинтронных эмиттеров фемтосекундными лазерными импульсами на длинах волн 400 и 800 нм.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-79-10353) и РТУ МИРЭА (грант «Для молодых ученых» НИЧ-56).

Список литературы

1. Гареев Г.З., Лучинин В.В. Применение ТГц-излучения для обеспечения жизнедеятельности человека // Биотехносфера. 2014. № 6 (36). С. 71-79.
2. Seifert T., et al. Efficient metallic spintronic emitters of ultrabroadband terahertz radiation // Nat. Photonics. 2016. V. 10. No. 7. P. 483-488.
3. Papaioannou E.T., Beigang R. THz spintronic emitters: a review on achievements and future challenges // Nanophotonics. 2021. V. 10. No. 4. P. 1243-1257.
4. Wu W., et al. Principles of spintronic THz emitters // Journal of Applied Physics. 2021. V. 130. P. 091101.
5. Khusyainov D.I., et al. Polarization control of THz emission using spin-reorientation transition in spintronic heterostructure. // Scientific reports. 2021. V. 11. No. 1. P. 1-8.
6. Khusyainov D.I., et al. Increasing the efficiency of a spintronic THz emitter based on WSe_2/FeCo // Materials. 2021. V. 14. No. 21. P. 6479.

А.Р. ГАЗИЗОВ^{1,2}, М.Х. САЛАХОВ^{1,2}, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт прикладных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ОПТОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА С ПОМОЩЬЮ ГИГАНТСКОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

В этой работе антистоксово гигантское комбинационное рассеяние моделируется в плазмонном нанорезонаторе, состоящем из металлической наночастицы и диэлектрической подложки. Представлено теоретическое описание оптомеханического охлаждения молекулярных колебаний, основанное на классической модели связанных осцилляторов. Используя эту модель, получена оптически индуцированная скорость затухания колебания, аналогичная квантово-механическому решению.

A.R. GAZIZOV^{1,2}, M.K. SALAKHOV^{1,2}, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

²Institute of Applied Research, Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

OPTOMECHANICAL COOLING OF A HARMONIC OSCILLATOR USING ENHANCED RAMAN SCATTERING

In this work, enhanced anti-Stokes Raman scattering is simulated in a plasmonic nanoresonator consisting a nanoparticle supported by dielectric substrate. We present the theoretical description of optomechanical cooling of a molecular vibration based on the classical model of coupled oscillators. Using this model we derive optically induced decay rate of vibration as in quantum mechanical solution.

Оптическое охлаждение – задача нанофотоники, решение которой полезно для развития квантовой сенсорики и оптического контроля локальной температуры. Одним из механизмов оптического охлаждения является антистоксово комбинационное рассеяние (КР) [1]. Существующие методы превышения антистоксова рассеяния над стоксовым рассеянием используют различные резонансы для увеличения поперечного сечения антистоксова КР [2] или подавления стоксова КР [1]. Существует несколько способов усиления КР: экситонные резонансы [2], оптические антенны [3, 4], материалы с околонулевой проницаемостью [5] и так далее. Альтернативным способом комбинационного охлаждения может быть использование резонаторной оптомеханики [6]. С другой

стороны, поглощения света отрицательно влияет на эффективность охлаждения, что означает существование определённого порога оптически индуцированной скорости затухания колебания.

Целью работы было моделирование оптомеханических эффектов в плазмонном нанорезонаторе, содержащем активные в КР молекулы. Используя простую модель двух связанных осцилляторов, мы даём интуитивно понятное описание оптомеханики нанорезонатора. Наш подход упрощает теоретическое описание проблемы для поиска систем для реализации оптомеханического охлаждения.

Взаимодействие описывается в рамках формализма тензорной функции Грина [3, 4], который мы считаем применимым в случае слабой оптомеханической связи молекулы и нанорезонатора. Отметим что при сильной связи решение нелинейной задачи не может быть записано с помощью функции Грина. Индуцированная нелинейным КР скорость затухания Γ_{opt} для сдвига частоты Ω имеет вид:

$$\Gamma_{opt} = \frac{1}{2\Omega} \text{Im} \mathbf{E}_L^\dagger \bar{\mathbf{R}}_Q \left[\left(\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}_{as}^{sc} \hat{\alpha}_{as} \right)^{-1} \bar{\mathbf{G}}_{as}^{sc} + \bar{\mathbf{G}}_S^{sc\dagger} \left(\bar{\mathbf{I}} - \bar{\mathbf{G}}_S^{sc} \hat{\alpha}_S \right)^{\dagger-1} \right] \bar{\mathbf{R}}_Q \mathbf{E}_L,$$

где \mathbf{E}_L – локальное поле в нанорезонаторе на лазерной частоте, $\bar{\mathbf{R}}_Q$ – тензор КР молекулы, α_S (α_{as}) – тензоры поляризуемости молекулы на стоксовой (антистоксовой частоте), \mathbf{G}^{sc} – тензор Грина рассеяния для излучателя в нанорезонаторе. Следует отметить, что эта скорость положительна, если лазер настроен ниже частоты оптоплазмонного резонанса. Более того, различный тип симметрии колебания приводит к различным скоростям затухания Γ_{opt} . Важную роль также имеет ориентация главных осей тензора поляризуемости относительно поля нанорезонатора.

Таким образом, было получено аналитическое выражение для индуцированной скорости затухания колебания в классическом случае.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 21-72-00052).

Список литературы

1. Chen Y.-Ch., Bahl G. // Optica. 2015. V. 2. P. 893-899.
2. Zhang J., Li D., Chen R., Xiong Q. // Nature. 2013. V. 493. P.504-508.
3. Gazizov A.R., Salakhov M.K., Kharintsev S.S. // J. Raman Spectrosc. 2020. V. 51. P. 442-451.
4. Газизов А.Р., Харинцев С.С., Салахов М.Х. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2018. Т. 160 (1). С. 61-71.
5. Газизов А.Р., Харитонов А.В., Харинцев С.С. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113 (3). С. 152-156.
6. Aspelmeyer M., Kippenberg T.J., Marquardt F. // Rev. Mod. Phys. 2014. V. 86, P. 1391.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ,
О.Б. АНДРЕЕВА

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

РЕКОМБИНАЦИОННОЕ СВЕЧЕНИЕ И КОМПТОНОВСКОЕ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕ ПРИ РАССЕЙАНИИ ФОТОНА АТОМНЫМ ИОНОМ

Теоретически предсказаны аналитическая структура, абсолютные значения и угловая анизотропия дважды дифференциальных сечений рекомбинационного свечения и комптоновского фотовозбуждения при рассеянии рентгеновского фотона атомным ионом.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV,
O.B. ANDREEVA

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

RECOMBINATION RADIATION AND COMPTON PHOTOEXCITATION IN THE SCATTERING OF A PHOTON BY AN ATOMIC ION

The analytical structure, absolute values, and angular anisotropy of the doubly differential cross sections for recombination radiation and Compton photoexcitation upon scattering of an X-ray photon by an atomic ion are theoretically predicted.

viet

Исследованы эффекты рекомбинационного свечения и комптоновского фотовозбуждения, инициированные неупругим рассеянием фотона атомным ионом. В качестве объекта исследования взят гелиоподобный ион атома кремния (Si^{12+} , заряд ядра иона $Z = 14$, конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2[{}^1S_0]$). Рассчитаны дважды дифференциальные сечения $d^2\sigma/d(\hbar\omega_c)d\Omega_c \equiv \sigma^{(2)}$ процессов рекомбинационного свечения:

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow 1sxp({}^1P_1) \rightarrow \left\{ \begin{matrix} K_s \\ K_d \end{matrix} \right\} + \hbar\omega_c,$$

$$K_s = 1sns({}^1S_0), K_d = 1smd({}^1D_2),$$

и комптоновского фотовозбуждения:

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow 1snl({}^1L_J) + \hbar\omega_c,$$

где $n \in [2; \infty)$, $m \in [3; \infty)$, $\hbar\omega$ ($\hbar\omega_c$) – энергия падающего (рассеянного) фотона и Ω_c – пространственный угол вылета рассеянного фотона. Структуры сечений при $\hbar\omega_c \in (3.5; 4.26)$ keV взяты из работы [1]. Результаты расчёта в \perp – схеме эксперимента (векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния) представлены на рис. 1. Установлены эффекты угловой анизотропии $\sigma_{BrS,RR}^{(2)}$ – и $\sigma_{CS,CPh}^{(2)}$ – сечений. Установлено также, что для теоретических ширины распадов состояний резонансы комптоновского фотовозбуждения практически подавлены по сравнению с резонансами рекомбинационного свечения.

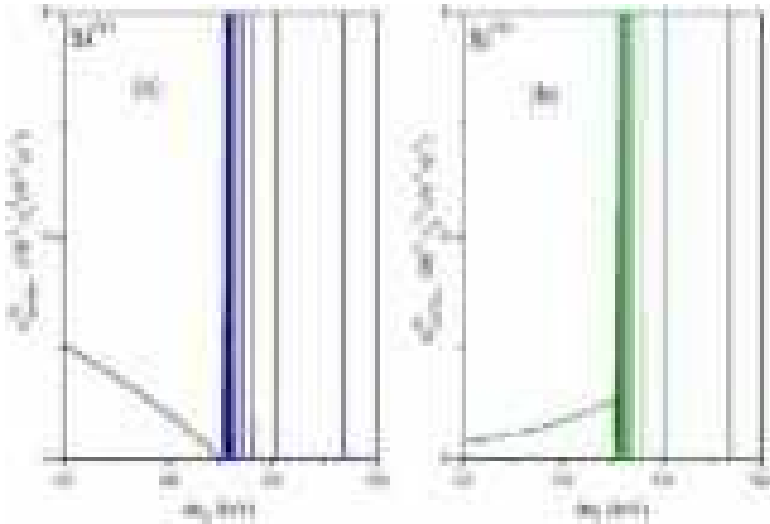


Рис. 1. Дважды дифференциальные сечения неупругого рассеяния фотона ионом Si^{12+} : сечение тормозного излучения (BrS) и рекомбинационного свечения (RR) (a); сечение комптоновского рассеяния (CS) и комптоновского фотовозбуждения (CPh) (b): $\hbar\omega = 6.7$ keV ($K\alpha-Fe^{24+}$ [2]), угол рассеяния $\theta = 90^\circ$, энергия порога ионизации $1s^2$ оболочки $I_{1s} = 2437.659$ eV [3], ширина спектрального разрешения предполагаемого эксперимента $\Gamma_{beam} = 0.5$ eV [4]

Список литературы

1. Хопёрский А.Н., Надолинский А.М. // Письма в ЖЭТФ. 2022. Т. 115. С. 469.
2. Malyshev V., et al. // Phys. Rev. A. 2019. V. 99. P. 010501.
3. Yerokhin V.A., et al. // Phys. Rev. A. 2022. V. 106. P. 022815.
4. Kujala N., et al. // Rev. Sci. Instrum. 2020. V. 91. P. 103101.

А.А. ДАЩИНСКИЙ, Д.А. КОРЕЦ, В.В. ФИЛАТОВ

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана***БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКАЯ КОНДЕНСАЦИЯ СВЕТА
В ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛАХ**

Бозе-эйнштейновская конденсация света (БЭК) – неклассическое (квантовое) фазовое состояние электромагнитного поля, в котором свет ведёт себя как сверхтекучая жидкость. Теория предсказывает, что свет может принимать состояние БЭК в резонансной оптической микрополости при подавлении теплового излучения внешним охлаждением. Данная работа посвящена получению и исследованию БЭК в естественных резонансных оптических микрополостях фотонных кристаллов.

A.A. DASHCHINSKII, D.A. KORETS, V.V. FILATOV

*Bauman Moscow State Technical University***BOSE-EINSTEIN CONDENSATION OF LIGHT
IN PHOTONIC CRYSTALS**

Bose-Einstein condensate (BEC) of light is a non-classical (quantal) phase state of electromagnetic field when the light acts as a superfluid liquid. Theory predicts light can "liquefy" into BEC in the resonant optical microcavity when external cooling suppresses the thermal radiation. This paper reports obtaining and investigations of BEC in natural resonant optical microcavities of photonic crystals.

Фотонные кристаллы (ФК) – метаматериалы с периодической оптической сверхструктурой, обладающие запрещёнными фотонными зонами в видимой области спектра. Особенности технологии синтеза ФК позволяют получить пористые образцы с наиболее совершенной структурой вдоль направления роста кристалла, поэтому исследования ФК проводятся преимущественно в указанном направлении. В этом случае реальный трёхмерный кристалл представляется эффективной одномерной сверхструктурой, для которой условия Блоха-Флоке определяют блоховские волны с законом дисперсии

$$\cos ka = \cos k_1 a_1 \times \cos k_2 a_2 - \frac{1}{2} \times (n_1/n_2 + n_2/n_1) \times \sin k_1 a_1 \times \sin k_2 a_2.$$

Здесь индекс $i = 1$ соответствует нечётным слоям сверхрешётки, $i = 2$ – чётным, a_i – толщины слоёв, n_i – показатели преломления, $k_i = \omega \times n_i / c$ – волновые числа, $a = a_1 + a_2$ – период сверхструктуры ФК, ω – циклическая частота и $c = 3 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Решением данного уравнения является функция

$$k(\omega) = (a_1 + a_2)^{-1} \times \arccos \{ \cos[(\omega n_1/c) \times a_1] \times \cos[(\omega n_2/c) \times a_2] - \\ - \frac{1}{2} \times (n_1/n_2 + n_2/n_1) \times \sin[(\omega n_1/c) \times a_1] \times \sin[(\omega n_2/c) \times a_2] \},$$

определяющая закон дисперсии электромагнитных волн в кристалле в виде $k = k(\omega)$, из которой следует существование областей отсутствия решений (запрещённых фотонных зон) в критической точке зоны Бриллюэна ($k = \pi/a$), а также в центре ($k = 0$). Внутри запрещённых зон свет не может распространяться, а на их границах групповая скорость электромагнитных волн

$$v = d\omega/dk = \{dk(\omega)/d\omega\}^{-1}$$

обращается в нуль: световое излучение проникает в кристалл лишь на глубину порядка длины волны, а затем останавливается. Результирующая стоячая световая волна и есть БЭК, поскольку плотность фотонных состояний в этот момент достигает резонансного значения

$$\rho \propto v^{-1} = (v \rightarrow 0) = \infty,$$

соответствующего коллапсу волновой функции в δ -пик бозе-конденсата.

Численное моделирование оптического поля в кристалле показывает, что электромагнитная энергия в ФК «конденсируется» в характерные «капли», локализованные в приповерхностном слое композита. Скорость роста «капель» определяется добротностью резонансных микрополостей ФК и увеличивается при понижении температуры.

В эксперименте капли бозе-конденсата в ФК наблюдаются уже при температуре кипения жидкого азота, что подтверждает предсказания о высокотемпературном характере поляритонной БЭК.

Таким образом, фотонные кристаллы представляются перспективными в качестве оптических сред для получения доступного поляритонного бозе-конденсата. В качестве возможных практических применений отметим возможность создания ФК-систем «оживления» «обычного» света в сверхтекучий поляритонный бозе-конденсат, что интересно как с фундаментальной точки зрения, так и в прикладном плане, например, для использования в ячейках оптического хранения информации (поскольку $v = 0$), применения ФК в качестве новых лазерных сред ($\rho \rightarrow \infty$), а также для гиперусиления локального электромагнитного поля, что необходимо во многих задачах практической спектроскопии и фотокатализа.

С.А. АСТАШКЕВИЧ, А.А. КУДРЯВЦЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ Na-Ar И Cs-Ar РЕЗОНАНСНОЙ ФОТОПЛАЗМЫ

Проведён сравнительный анализ результатов моделирования Na-Ar и Cs-Ar резонансной фотоплазмы в цилиндрической газовой ячейке при давлениях $P_{\text{Na}} = P_{\text{Cs}} = 0.02$ торр и $P_{\text{Ar}} = 1$ торр. Установлено, что степень ионизации в Cs-Ar фотоплазме существенно (до 25 раз) выше, чем для Na-Ar фотоплазмы, а температура электронов наоборот больше (до 1.5 раз) для Na-Ar фотоплазмы, чем для Cs-Ar фотоплазмы для скоростей возбуждения резонансных уровней $K_{\text{рез}} = 3 \times 10^{23} - 10^{25} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$.

S.A. ASTASHKEVICH, A.A. KUDRYAVTSEV
Saint-Petersburg State University

COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS OF Na-Ar AND Cs-Ar RESONANCE PHOTOPLASMAS

A comparative analysis of the results of modeling of Na-Ar and Cs-Ar resonance photoplasmas in a cylindrical gas cell at pressures $P_{\text{Na}} = P_{\text{Cs}} = 0.02$ torr and $P_{\text{Ar}} = 1$ torr is carried out. It is established that the degree of ionization for the Cs-Ar photoplasma is significantly (up to 25 times) higher than for the Na-Ar one, and the electron temperature, on the contrary, is higher (up to 1.5 times) for the Na-Ar photoplasma than for the Cs-Ar one for the rates of resonance level excitation $K_{\text{res}} = 3 \times 10^{23} - 10^{25} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$.

Проведён сравнительный анализ параметров моделирования Na-Ar и Cs-Ar резонансной фотоплазмы в цилиндрической ячейке ($R_1 = 0.5$ см; $L_1 = 1$ см) при пространственно однородной скорости возбуждения $K_{\text{рез}}$ резонансных уровней 3^2P (Na) и 6^2P (Cs) при давлениях $P_{\text{Na}} = P_{\text{Cs}} = 0.02$ торр и $P_{\text{Ar}} = 1$ торр и газовой температуре 580 и 438 К для Na-Ar и Cs-Ar смесей, соответственно. Концентрации основных, резонансных и высоковозбуждённых уровней, атомарных и молекулярных ионов атомов щёлочного металла, концентрация и температура электронов были определены в результате самосогласованной итерационной процедуры решения уравнения баланса заселённости атомарных уровней и концентрации электронов и ионов и уравнения баланса энергии электронов [1]. Были учтены пенинговская, ассоциативная и ступенчатая ионизация, процессы передачи возбуждения с резонансных на

высоковозбужденные уровни, неупругие электрон-атомные удары первого и второго рода, столкновительно-излучательная и диссоциативная рекомбинация атомарных и молекулярных ионов. Были учтены перенос заряда в фотоплазме под действием амбиполярной диффузии и перенос резонансного излучения в приближении Бибермана-Холстейна.

Важно отметить, что моделирование Na-Ar, как и Cs-Ar, фотоплазмы, в отличие от работы [1], проведено с учётом столкновительного уширения D1 и D2 линий, ограниченной только учётом доплеровского уширением этих линий Na. Расчёт эффективных вероятностей радиационных переходов для резонансных линий проведён по методике [2].

Установлено, что фотоплазма в Cs-Ar смеси создается при минимальном значении $K_{\text{рез}} = 2 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$, в отличие от Na-Ar смеси, для которой это значение на порядок величины больше (рис. 1). Также концентрация электронов в Cs-Ar фотоплазме значительно (до 30 раз) больше, чем в Na-Ar фотоплазме (рис. 1а). Причина этого состоит как в меньших (приблизительно в 2 раза) значениях эффективной вероятности радиационных переходов для D1 и D2 линий Cs по сравнению с Na, так и в меньших (в 2 - 3.5 раза) значениях времени амбиполярной диффузии для Cs-Ar фотоплазмы, чем для Na-Ar фотоплазмы. Обнаружено, что температура электронов больше для Na-Ar фотоплазмы, чем для Cs-Ar плазмы, причём это различие возрастает для $K_{\text{рез}} > 3 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ (рис. 1б).

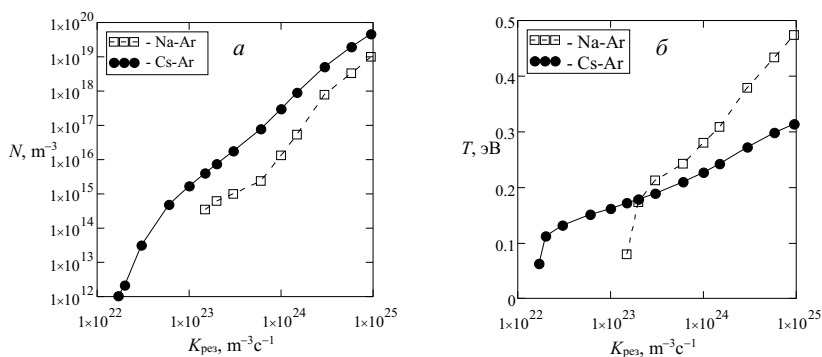


Рис. 1. Зависимости концентрации (а) и температуры (б) электронов в Na-Ar и Cs-Ar фотоплазме от скорости возбуждения резонансных уровней K_{res}

Список литературы

1. Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 10. P. 103509.
2. Astashkevich S.A., Mandour M.M., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2022. V. 288. P. 108256.

М.М. МАНДУР¹, С.А. АСТАШКЕВИЧ, А.А. КУДРЯВЦЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет
¹Университет Загазиг, Загазиг, Египет

ВЛИЯНИЕ СТОЛКОВИТЕЛЬНОГО УШИРЕНИЯ D1 И D2 ЛИНИЙ Na НА ХАРАКТЕРИСТИКИ Na-Ar ФОТОПЛАЗМЫ

Проведён сравнительный анализ результатов 2D симуляции параметров фотоплазмы двухкамерной Na-Ar газовой ячейки для доплеровского и фойгтовского контуров D1 и D2 линий Na при давлениях Na и Ar 0.02 и 0.1 - 10 торр, соответственно. Установлено, что учёт уширения этих линий Na-Na и Na-Ar столкновениями является необходимым и приводит к значительных отличиям как концентрации и температуры электронов, так и фото-ЭДС.

M.M. MANDOUR¹, S.A. ASTASHKEVICH, A.A. KUDRYAVTSEV
Saint-Petersburg State University
¹Zagazig University, Zagazig, Egypt

EFFECT OF COLLISIONAL BROADENING OF THE D1 AND D2 LINES OF Na ON CHARACTERISTICS OF Na-Ar PHOTOPLASMA

A comparative analysis of results of 2D simulation of the photoplasma parameters of a two-chamber Na-Ar gas cell for the Doppler and Voigt contours of D1 and D2 lines of Na at the Na and Ar pressures 0.02 and 0.1 - 10 torr respectively is carried out. It is established that taking into account the broadening of these lines by the Na-Na and Na-Ar collisions is necessary and leads to significant differences as in the electron density and temperature so the photo-EMF.

Проведён анализ влияния столкновительного уширения D1 и D2 резонансных линий Na на параметры фотоплазмы в цилиндрической двухкамерной ячейке [1, 2] со смесью Na и Ar в диапазоне давлений $P_{Ar} = 0.1 - 10$ торр при давлении $P_{Na} = 0.02$ торр и температуре газовой смеси $T_g = 580$ К при скорости возбуждения резонансных уровней Na в первой камере $K_{рез} = 6 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$. Эти параметры были получены в результате 2D симуляции, используя модель из работы [1].

На рис. 1 приведены полученные данные для максимальных значений концентрации 3^2P резонансных уровней Na, концентрации и температуры электронов в первой камере ячейки и фото-ЭДС газовой ячейки для

доплеровского и фойгтовского контуров D1 и D2 линий Na. При расчёте с фойгтовским контуром учтено резонансное Na-Na и ван-дер-ваальсовское Na-Ar столкновительные уширения этих линий. Видно, что учёт столкновительного уширения резонансных линий является необходимым и приводит к значительно меньшим значениям этих параметров фотоплазмы. Полученные результаты важны для проектирования фотоэлектрических преобразователей на основе смесей паров щёлочных металлов и инертных газов.

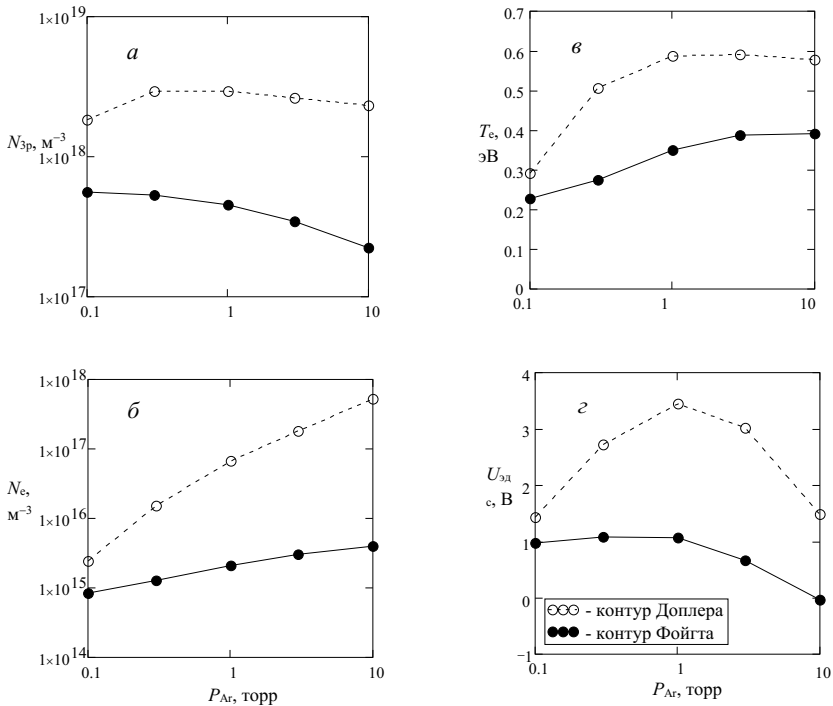


Рис. 1. Зависимость от давления Ar максимальных значений концентрации резонансных 3p уровней Na (а), концентрации (б) и температуры (в) электронов в первой камере ячейки и фото-ЭДС (г) газовой ячейки для доплеровского и фойгтовского контуров D1 и D2 линий Na

Список литературы

1. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. No. 11. P. 115005.
2. Astashkevich S.A., Mandour M.M., Kudryavtsev A.A. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2022. V. 288. P. 108256.

И.С. АЛИМКИНА¹, В.В. ФИЛАТОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

НЕЛИНЕЙНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В РУБИНЕ

Настоящая работа посвящена исследованию нелинейного поведения материальной среды (кристаллического рубина $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) при широкополосном оптическом возбуждении в резонансной области диэлектрической функции, приводящего к индуцированию прозрачности вещества.

I.S. ALIMKINA¹, V.V. FILATOV

Bauman Moscow State Technical University

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

NONLINEAR OPTICAL EFFECT IN RUBY

This work investigates the nonlinear behavior of a material medium (crystalline ruby $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$) under optical excitation in the resonant region of the dielectric function leading to the electromagnetically induced transparency.

Как показывают наши исследования, широкополосное оптическое возбуждение кристаллического рубина $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ в области резонансов диэлектрической функции (электронные уровни E и $2A$, соответствующие линиям лазерной генерации $R_1 = 694,3$ нм и $R_2 = 692,8$ нм) приводит к формированию в поляритонном спектре кристалла близкорасположенных резонансов плотности поляритонных состояний (бозе-конденсатов), взаимодействующих между собой. Происходит перестройка структуры поляритонного спектра материала: исходные поляритонные ветви $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ расщепляются на разбегающиеся взаимодействующие подветви, причём по достижении области кроссовера внутренние подветви схлопываются, вызывая (само-)индуцирование прозрачности образца, наблюдающееся в эксперименте.

На рис. 1 приведены результаты численного моделирования групповой скорости $v = d\omega/dk$ электромагнитных волн в рубине. Точки аномального замедления света в кристалле ($v = 0$ м/с) соответствуют спектральному положению поляритонных бозе-конденсатов (БЭК). Взаимодействие БЭК приводит к расщеплению исходных поляритонных ветвей $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$ (показаны серым) на «разбегающиеся» в обе стороны взаимодействующие подветви (показаны чёрным). По достижении точки кроссовера

внутренние подветви схлопываются. Стрелкой отмечено схлопывание «длинноволновой» поляритонной подветви исходного уровня R_2 при достижении локальным магнитным полем БЭК величины 33 Тл. Отметим, что в этот момент среда становится оптически-прозрачной, однако БЭК не разрушается, но один конденсат «вливается» в другой.

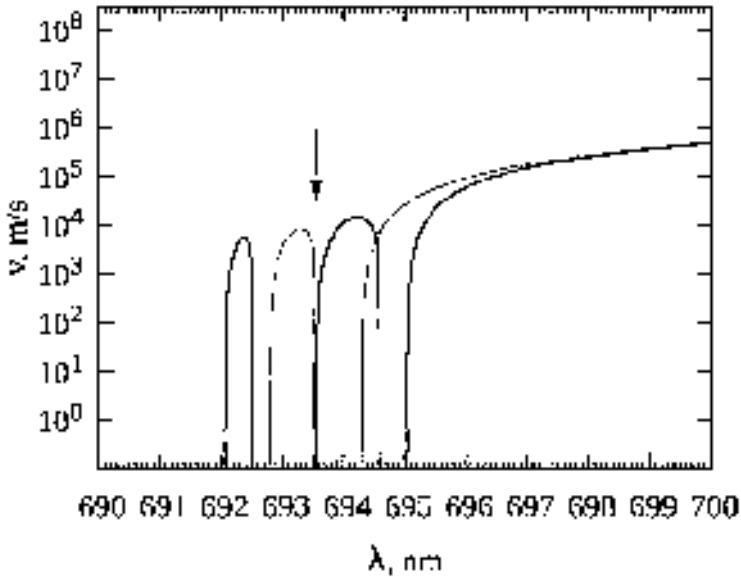


Рис. 1. Численное моделирование групповой скорости $v = d\omega/dk$ электромагнитных волн в рубине

М.А. МАЛЕЦ, Н.Х. ЧИНЬ¹, М.А. ФОКИНА, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусская государственная академия связи, Минск
¹Университет Винь, Ханой, Вьетнам

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Проведён послойный анализ металлов и сплавов, содержащих в своём составе олово, и изучена возможность получения наноплёнок на металлической поверхности. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Данным способом можно получать наноплёнки не только чистых металлов, но и композиционных сплавов. Показана возможность напыления наноплёнок для создания газочувствительных сенсоров.

М.А. MALETS, N.H. TRINH¹, M.A. FOKINA, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State Academy of Communications, Minsk
¹Vinh University, Hanoi, Vietnam

STUDYING THE POSSIBILITY OF CREATING GAS-SENSITIVE SENSORS BY LASER ATOMIC-EMISSION SPECTROMETRY

A layer-by-layer analysis of metals and alloys has been carried out, and the possibility of deposition of nanofilms containing tin in their on various types of the metal surfaces has been studied. The experiments were carried out using a laser two-pulse multichannel atomic emission spectrometer LSS-1. This method can be used to obtain nanofilms of not only pure metals, but also composite alloys. The possibility of obtaining nanofilms for creating gas-sensitive sensors is shown.

Материалы, содержащие в своём составе оксиды полупроводников, могут использоваться как активные элементы устройств газового контроля, так как характеризуются следующими свойствами: высокая чувствительность к составу газовой фазы, каталитическая активность, высокая реакционная способность поверхности. Особое значение имеют физические способы получения многокомпонентных порошков, когда образование частиц происходит в неравновесных условиях. В частности, это имеет место при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на твёрдые тела, содержащие в себе различные соединения металлов [1].

Использование методов двухимпульсного лазерного воздействия на мишень позволяет одновременно проводить высокочувствительный спектральный анализ образованной плазмы и контролировать в ней концентрацию заряженных частиц [2].

Для проведения исследований использовался многоканальный лазерный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов, так и временного интервала между импульсами. Послойный анализ полученных наноплёнок (зависимость интенсивности линий олова и цинка от номера лазерных импульсов), а также внешний вид полученных наноструктур на металлической поверхности приведены на рис. 1 и 2. Энергия лазерных импульсов составила 49 и 46 мДж, а временной интервал между импульсами равнялся 10 мкс.

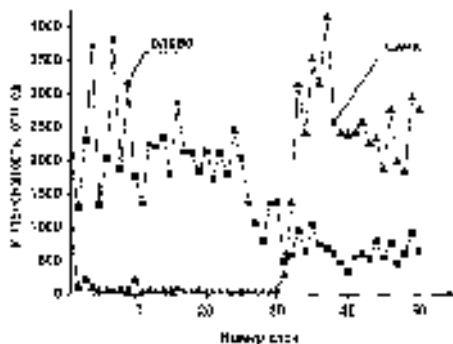


Рис. 1. Послойный анализ наноплёнки

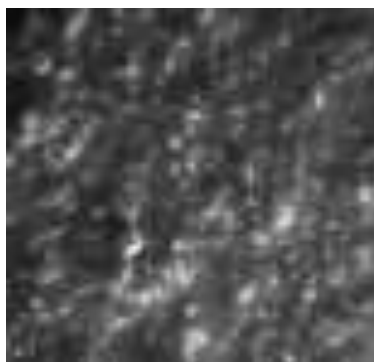


Рис. 2. Внешний вид напылённой наноплёнки

Таким образом, данным способом можно получать нанопорошки металлов и композиционных сплавов, что позволит создавать газочувствительные сенсоры. Используя лазерное воздействие на мишень, можно проводить анализ состава лазерного факела и целенаправленно менять его компонентный состав.

Список литературы

1. Shukla G. // J. Phys. D Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 75-105.
2. Suzuki A., Matsushita T., Aoki T., Okuda M. // Thin Solid Films. 2003. V. 445. P. 263-267.

Н.Х. ЧИНЬ¹, М.А. МАЛЕЦ, М.П. ПАТАПОВИЧ

Белорусская государственная академия связи, Минск

¹*Университет Винь, Ханой, Вьетнам*

НАПЫЛЕНИЕ НАНОКЛАСТЕРОВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ СТЕКЛА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МИШЕНИ

Изучена возможность напыления наноплёнок, содержащих в своём составе олово, на поверхность стекла при воздействии двоекных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха. Исследования проводились с использованием лазерного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Выполненные спектроскопические исследования лазерной плазмы, образованной при воздействии двух последовательных импульсов на мишень, иллюстрируют развитие методов получения нанокластеров различных химических элементов.

N.H. TRINH¹, M.A. MALETS, M.P. PATAPOVICH

Belarusian State Academy of Communications, Minsk

¹*Vinh University, Hanoi, Vietnam*

DEPOSITION OF NANOCCLUSERS OF COMPOSITE MATERIALS ON THE SURFACE OF THE GLASS DURING LASER ABLATION OF A TARGET

The possibility of deposition of nanofilms containing tin in their composition on glass surface under the action of dual laser pulses on a target in an air atmosphere has been studied. The experiments were carried out using a laser two-pulse multichannel atomic emission spectrometer LSS-1. The performed spectroscopic studies of laser plasma formed by the action of two successive pulses on a target illustrate the development of methods for obtaining nanoclusters of various chemical elements.

Тщательное изучение различных особенностей металлов создавать материалы, которые отличаются своими уникальными свойствами. Материалы, полученные таким способом, находят применение в различных областях науки и техники. Поэтому исследование и развитие методов синтеза наночастиц с необходимыми свойствами является важной практической задачей [1, 2].

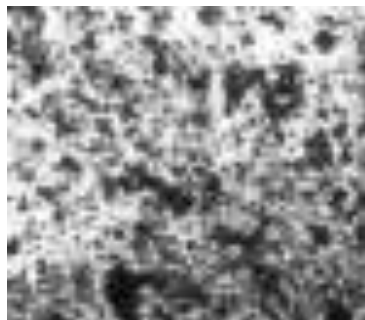
Техника импульсного лазерного напыления является одним из основных инструментов современных нанотехнологий. Для проведения исследований был использован лазерный многоканальный атомно-

эмиссионный спектрометр LSS-1, который включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM).

Динамика напыления на поверхность стекла наночастиц, в состав которых входят соединения олова и цинка, была изучена воздействием серии двоек лазерных импульсов на мишень из олова, приведённого скотчем к поверхности цинка, установленную под углом 45° к падающему излучению и подложке на расстоянии 4 мм. Энергия каждого импульса излучения составляла 35 мДж, а временной интервал между импульсами находился в интервале от 0 до 20 мкс. На рис. 1 представлено изображение стекла с напылёнными наночастицами под микроскопом при увеличении в 3 раза (рис. 1а) и в 10 раз (рис. 1б).



а



б

Рис. 1. Снимок наноплёнки с увеличением в 3 раза (а) и в 10 раз (б)

Таким образом, в ходе проведённого эксперимента показана возможность синтеза тонкоплёночных покрытий на поверхности стекла с использованием двоек лазерных импульсов непосредственно в воздухе. При этом уровень негативного воздействия окружающей атмосферы на процессы осаждения снижен до приемлемого.

Список литературы

1. Ильин А.П., Мостовщиков А.В., Коршунов А.В. // Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов. 2017.
2. Баззал Х., Воропай Е.С., Забогин А.П., Патапович М.П. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2019. Вып. 11. С. 57-64.

Н.Х. ЧИНЬ¹, А.Е. ЯГЕЛО, М.П. ПАТАПОВИЧ

Белорусская государственная академия связи, Минск

¹Университет Винь, Ханой, Вьетнам

ПРОЦЕСС ПЛАЗМООБРАЗОВАНИЯ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Изучено влияние расфокусировки лазерного пучка на процессы образования лазерной плазмы при воздействии лазерных импульсов на поверхность мишени в атмосфере воздуха. Исследования проводились с помощью атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Приведено краткое обсуждение результатов эксперимента.

N.H. TRINH¹, A.E. YAGELO, M.P. PATAPOVICH

Belarusian State Academy of Communications, Minsk

¹Vinh University, Hanoi, Vietnam

THE PROCESS OF PLASMAFORMATION NEAR THE SURFACE OF MULTICOMPONENT ALLOYS DURING LASER ABLATION

The effect of laser beam defocusing on the laser plasma formation, when the target is exposed to laser pulses in the air, has been studied. The investigations were performed using atomic emission spectrometer LSS-1. The obtained results have been summarized.

Исследование и развитие методов синтеза наночастиц с заданными свойствами является важной практической задачей. Такие материалы могут применяться в различных отраслях производства [1]. В частности, медь широко используется как в чистом виде, так и в виде сплавов с различными металлами. Плёнки из диоксида олова, полученные на стеклянной поверхности, могут быть использованы в датчиках горючих газов в воздухе.

Для оценки эффективности обработки таких соединений, необходимо детально изучить влияние расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на характеристики плазмы, образованной вблизи поверхности материала, при лазерной абляции [2, 3]. С этой целью в ходе проводимых экспериментов использовался лазерный двухимпульсный спектрометр LSS-1, который предназначен для качественного, полуколичественного и количественного определения состава твёрдых и жидких образцов посредством анализа полученных эмиссионных спектров. Изменять

количество вещества, поступающего в лазерную плазму можно, увеличивая площадь лазерного пятна на облучаемой поверхности. В качестве примера, на рис. 1, представлена зависимость интенсивности спектральных линий олова и меди от параметра расфокусировки при воздействии серии 200 сдвоенных лазерных импульсов на поверхность сплава меди и олова. При этом энергия воздействующих импульсов составляла 49 и 46 мДж, а временной интервал между импульсами равнялся 10 мкс. Длина волны для линии меди равнялась 510, 798 нм; для олова – 452,56 нм.

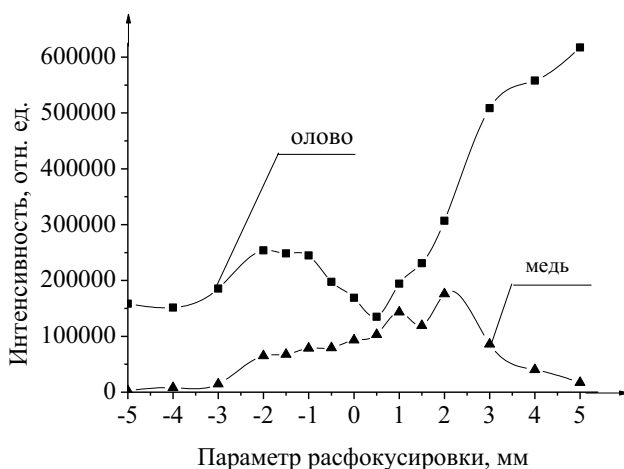


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Таким образом, изменение плотности потока излучения при расфокусировке лазерного луча в случае воздействия на мишень сдвоенных лазерных импульсов меняет плазмохимический процесс испарения и эрозию поверхности образца.

Список литературы

1. Suzuki A., Matsushita T., Aoki T., Okuda M. // *Thin Solid Films*. 2003. V. 445. P. 263-267.
2. Баззал Х., Воропай Е.С., Зажогин А.П., Патапович М.П. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019. Вып. 11. С. 57-64.
3. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu. // *Central European Journal of Physics*. 2003. V. 1. No. 2. P. 334-354.

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО

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

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ В УСТАНОВКАХ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

В работе рассматривается теоретическая модель, оценивающая силу воздействия оптического излучения на ионизированный газ. Выдвигается гипотеза о возможности применения такого рода воздействия для установок термоядерного синтеза. Приводятся основные характеристики. Оценивается применимость.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

THE ESTIMATION THE POSSIBILITIES OF USING OPTICAL RADIATION FOR PLASMA CONFINEMENT IN FUSION SETUPS

In this paper a theoretical model which estimates the impact force of optical radiation on plasma. The description of the features of the application and the theoretical substantiation of the proposed method are given.

Перспективными установками термоядерного синтеза являются токамаки – тороидальные камеры с магнитными катушками [1]. Для выхода на рабочий режим и достижения необходимых параметров плазмы применяют ряд современных технологий, таких как сверхпроводящие элементы, фемтосекундные лазеры. Дальнейшим развитием токамаков являются устройства аналогичного назначения с магнитными системами удержания плазмы, имеющие сферическую форму. Такие установки имеют более высокие характеристики: в них достигается большая плотность и температура плазмы. Однако существует проблема просачивания плазмы через торцевые (верхние и нижние) части [1]. В связи с этим требуется дополнительно предусмотреть невозможность выхода плазмы из данных областей.

Оптические вихри в текущее время активно применяются для захвата и удержания частиц [2]. Многочисленные эксперименты показывают перспективность и практическую реализуемость данного подхода [2]. Целесообразно применить оптические вихри и образуемые ими ловушки для удержания плазмы.

Целью работы является теоретический расчёт силы взаимодействия оптического излучения на ионизированный газ и предложение методов применения для установок термоядерного синтеза.

В работе [2] описывается несколько механизмов взаимодействия оптического излучения с наночастицами и делается вывод о наибольшем вкладе градиентной силы. Данный эффект проявляется при резком изменении напряжённости электромагнитного поля. Предложенное в работе [2] уравнение для оценки силы взаимодействия оптического излучения и наночастиц применено в разработанной модели. При этом учитывались характерные размеры ионов дейтерия, относительная диэлектрическая проницаемость. На рис. 1 представлена зависимость силы, воздействующей на ион дейтерия в зависимости от мощности лазерного излучения с длиной волны 1080 нм. Точкой на графике отмечена сила, достаточная для удержания плазмы при рабочем давлении в камере [1].

Из графика на рис. 1 видно, что мощность лазера, необходимая для удержания плазмы, равна приблизительно 100 Вт. Ввиду небольшой мощности оптические вихри легко могут применяться в виде массивов, двухмерных ловушек и целых плоскостей. Кроме того, повышение мощности лазерного излучения целесообразно при стартовых режимах работы установки (начальный разогрев плазмы). Кроме того, каналы из оптических вихрей (так называемые бутылочные пучки) могут применяться для отвода энергии (и плазмы) из рабочего объёма термоядерного реактора.

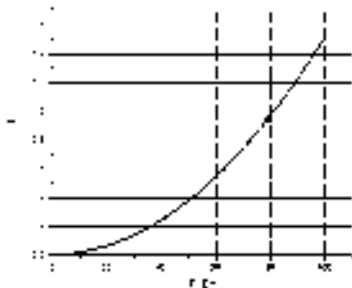


Рис. 1. Зависимость силы воздействия от мощности

Список литературы

1. Хвостенко П. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез. 2019. Т. 42 (1). С. 15-38.
2. Faegheh H., et al. // Optics Express. 2010. V. 18 (2). P. 1-9.

В.А. КОЖЕВНИКОВ, В.Е. ПРИВАЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ He-Ne ЛАЗЕРА С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ ТРУБКИ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ИНВЕРСИИ НАСЕЛЁННОСТЕЙ НА ОСИ

Авторами был рассмотрен положительный столб разряда в лазерных трубках с изменяющимся диаметром. Была получена зависимости инверсии населённости на оси трубки от поперечных размеров трубки. Эта зависимость была использована для усовершенствования метода расчёта мощности излучения He-Ne лазера с произвольной геометрией активного элемента. В данной работе рассматривается поперечное сечение активного элемента в виде эллипса.

V.A. KOZHEVNIKOV, V.E. PRIVALOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

OUTPUT POWER OF He-Ne LASER WITH AN ELLIPTICAL TUBE SECTION, TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN THE POPULATION INVERSION ON THE AXIS

The authors considered a positive discharge column in laser tubes with a variable diameter. The dependence of the population inversion on the tube axis on the transverse dimensions of the tube was obtained. This dependence was used to improve the method for calculating the radiation power of a He-Ne laser with an arbitrary geometry of the active element. In this paper, we consider the cross section of the active element in the form of an ellipse.

В работе [1] нами были исследованы процессы в положительном столбе (ПС) разряда в лазерных трубках изменяющегося диаметра. Была получена система дифференциальных уравнений, связывающих внешние параметры ПС (радиус разрядного канала $R(z)$, давление напуска газа p_H , и разрядный ток I_D) с его основными внутренними характеристиками (электронной температурой T_e , концентрацией заряженных частиц n , напряжённостью продольного электрического поля E_z), и затем эта система была сведена к гораздо более простой системе трансцендентных уравнений. Из этой системы также может быть получена зависимость инверсии населённости активной среды на оси трубки δN_0 от поперечного размера активного элемента [2]. В работе [3] нами был предложен метод расчёта мощности излучения He-Ne лазера с произвольной

геометрической формой поперечного сечения активного элемента, и была посчитана мощность излучения лазера с различными поперечными сечениями активного элемента в предположении слабой зависимости δN_0 от его поперечных геометрических размеров. В данной работе рассматривается эллиптическое поперечное сечение. Расчёт мощности проводился по формуле

$$P = \gamma \iiint_{NMV(u,v,z)} dzdvdu (a^2 - b^2) \frac{\text{sh}^2(u) + \sin^2(v)}{w^2(z)} \cdot Ce_0(u, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)) \times \\ \times ce_0(v, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)) \cdot \exp \left[\frac{-2(a^2 - b^2)}{w^2(z)} (\text{sh}^2(u) + \cos^2(v)) \right],$$

где (u, v, z) – эллиптические координаты (z отсчитывается от перемычки гауссового пучка), $\gamma = \frac{2E_0^2 \delta N_0 \epsilon R_e}{k \cdot Ce_0(0, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)) \cdot ce_0(\frac{\pi}{2}, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2))}$,

a и b – полуоси эллипса, $Ce_0(u, q)$ и $ce_0(v, q)$ – функции Матье (мы используем обозначения [4]), R_e – радиус кривизны соответствующего эквивалентного конфокального резонатора, $w(z) = \{(R_e + 4z^2 / R_e) / k\}^{1/2}$, k – волновое число, E_0 – значение модуля напряжённости поля на оси при $z = R_e/2$, параметр λ – минимальное решение уравнения

$$Ce_0 \left(\frac{1}{2} \ln \frac{a+b}{a-b}, \frac{\lambda^2(a^2 - b^2)}{4} \right) = 0, \quad \text{интегрирование происходит по}$$

эффективному модовому объёму NMV [3], а зависимость инверсии населённостей δN_0 на оси трубки от поперечных размеров трубки взята из [2]. Расчёты мощности лазера с эллиптическим сечением находятся в лучшем согласии (по сравнению с [3]) с расчётами среднего по сечению коэффициента усиления такого лазера из работы [5].

Список литературы

1. Кожевников В.А., Привалов В.Е., Фотиади А.Э. // НТВ СПбГПУ. ФМН. 2019. Т. 12. № 4. С. 97-107.
2. Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Fotiadi A.E., Shemanin V.G. // Proc. of EExPolytech. 2021. P. 176-178.
3. Кожевников В.А., Привалов В.Е., Фотиади А.Э. // НТВ СПбГПУ. ФМН. 2021. Т. 14. № 3. С. 133-145.
4. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables / ed. by M Abramowitz, I.A Stegun. National Bureau of Standards, Tenth Printing, 1972.
5. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // НТВ СПбГПУ. ФМН. 2018. Т. 11. № 2. С. 84-95.

В.А. КОЖЕВНИКОВ, Е.Г. АПУШКИНСКИЙ, А.М. БИРЮКОВ
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

УСИЛЕНИЕ He-Ne ЛАЗЕРА С ЭКЗОТИЧЕСКИМ СЕЧЕНИЕМ АКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Авторами было рассмотрено поперечное сечение активного элемента в виде треугольника с кругами в вершинах, для которого ранее предполагался значительный рост коэффициента усиления. Расчёт усиления проводился с использованием предложенного ранее метода нахождения приближённого решения уравнения Гельмгольца, а также методами конечных разностей и конечных элементов. Результаты расчёта всеми тремя методами согласуются и приводят к выводу о неперспективности подобного сечения.

V.A. KOZHEVNIKOV, E.G. APUSHKINSKIY, A.M. BIRYUKOV
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

GAIN OF He-Ne LASER WITH EXOTIC SECTION OF ACTIVE ELEMENT

The authors considered the cross section of the active element in the form of a triangle with circles at the vertices, for which a significant increase in the gain was previously assumed. The gain was calculated using the previously proposed method for finding an approximate solution of the Helmholtz equation, as well as by the FDM and FEM methods. The results of calculations by all three methods are consistent and lead to the conclusion that such a cross section is unpromising.

В работе [1] было предложено поперечное сечение активного элемента He-Ne лазера, дающее среднее по сечению значение коэффициента усиления на порядок больше, чем у традиционного круглого сечения в виде треугольника с кругами в вершинах (рис. 1). В работе [2] был предложен метод расчёта среднего по сечению коэффициента усиления He-Ne лазера, основанный на нахождении приближённого решения уравнения Гельмгольца, и он был опробован на поперечных сечениях, допускающих аналитическое решение соответствующего уравнения (круг, прямоугольник, эллипс). В работе [3] это метод был применён к данному сечению, и было показано, что коэффициент усиления лазера с таким сечением меньше, чем у круглого сечения. В данной работе было решено сравнить вычисления предложенным методом для такого сечения с расчётами по методу конечных разностей (МКР) и методу конечных

элементов (МКЭ) – для окончательного “закрытия” вопроса по такому сечению, дополнительной проверке предложенного метода нахождения приближённого решения уравнения Гельмгольца и сравнения его производительности с МКР и МКЭ.

Для корректности сравнения для всех трёх методов использовалась единая вычислительная среда с MATLAB, программы для предложенного метода и МКР были самописными, а для МКЭ использовалась известная библиотека PDE Toolbox [4]. Сравнивались среднее по сечению значение коэффициента усиления, время расчёта и используемая при этом MATLAB память – для разных отношений b/a радиуса круга b в вершине и стороны треугольника a . Результаты расчёта всеми тремя методами дают очень близкие значения коэффициента усиления (с увеличением числа узлов расчёта, разумеется, все три значения стремятся к одному), соответствующие работе [3] – то есть коэффициент усиления такой фигуры меньше, чем коэффициент усиления обычного равностороннего треугольника, причём с уменьшением отношения b/a коэффициент усиления монотонно стремится к коэффициенту усиления треугольника. Предлагаемый метод – самый быстрый из трёх рассматриваемых (при большом количестве узлов – значительно быстрее, чем МКР), и требует примерно столько же памяти, что и МКР (и гораздо меньше памяти при большом количестве узлов, чем МКЭ). Таким образом, можно сделать вывод как о неперспективности подобного сечения активного элемента для He-Ne лазера, так и о перспективности предлагаемого метода нахождения приближённого решения уравнения Гельмгольца.



Рис. 1. Форма поперечного сечения

Список литературы

1. Привалов В.Е. // Известия ВУЗов. Физика. 2013. Т. 56. № 2/2. С. 246-253.
2. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // НТВ СПбГУ. ФМН. 2018. Т. 11. № 2. С. 84-95.
3. Кожевников В.А., Привалов В.Е. // Известия ВУЗов. Физика. 2018. Т. 61. № 10 (730). С. 102-106.
4. Partial Differential Equation Toolbox. URL: <https://www.mathworks.com/products/pde.html>.

О.А. АХМЕТОВА¹, А.А. ЗЕМЛЯНОВ², О.В. МИНИНА^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ В ТОЧКАХ НАЧАЛА ОСТАНОВКИ КОЛЛАПСА И НЕЛИНЕЙНОГО ФОКУСА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ МОЩНОГО ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрена задача о самофокусировке мощного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе и две характерные для этого процесса точки: начала остановки коллапса и нелинейного фокуса. Показано, что остановка коллапса интенсивности реализуется на интервале перед нелинейным фокусом. Установлено двукратное увеличение интенсивности на интервале от начала остановки коллапса до фокуса.

О.А. AKHMETOVA¹, А.А. ZEMLYANOV², О. V. MININA^{1,2}

¹National Research Tomsk State University

²V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk

ESTIMATES OF THE INTENSITY AT THE POINTS OF BEGINNING OF THE COLLAPSE STOP AND NONLINEAR FOCUS DURING PROPAGATION OF HIGH-POWER FEMTOSECOND LASER RADIATION

The problem of self-focusing of high-power femtosecond laser radiation in air and two characteristic points for this process (the beginning of the collapse stop and the nonlinear focus) are considered. It is shown that the intensity collapse is stopped at the interval in front of the nonlinear focus. A twofold intensity increase from point of the beginning of the collapse stop to the focus is established.

Для понимания основных механизмов нелинейно-оптического взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом важное значение имеет решение проблемы волновых коллапсов. Одним из проявлений этого процесса является самофокусировка света [1]. В рамках данной работы её рассмотрение в соответствии с [2] проводится на участке Δz от точки начала остановки коллапса z_c до нелинейного фокуса z_f (здесь и далее индексы «f» и «c» соответствуют величинам, определяемым в этих точках). При рассмотрении зависимости пиковой интенсивности I от дистанции распространения z значение z_f определяется координатой

максимального значения $I(z)$; значение z_c – сменой знака кривизны кривой $I(z)$, поскольку после точки z_c катастрофический рост интенсивности сменяется плавным выходом на насыщение.

Используя уравнение для интенсивности волны, полученное в рамках амплитудно-фазового подхода [3], формулу для определения пиковой интенсивности в фокусе I_f можно записать в виде

$$I_f(z_f, \tau) = I_c(\mathbf{R} = 0, z_f, \tau) e^{\Delta D(\mathbf{R}=0, z_f, \tau)}, \quad (1)$$

где τ – время, I_c – интенсивность в точке z_c , $\Delta D = D_f - D_c$, \mathbf{R} – поперечный вектор с координатами x, y . Разложение ΔD из (1) вблизи точки z_c в ряд Тейлора, и его численное суммирование показало, что $I_f \simeq 2I_c$.

Сравнение полученного теоретического значения с результатами численного расчёта интенсивности при распространении фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе из [4] представлено на рис. 1. Для удобства интерпретации полученных значений зависимость из [4] (жирная кривая) нормирована на I_f . На основе соотношений из [2] были рассчитаны координаты z_c и z_f (штриховые линии на рис. 1), определяющие интервал Δz , на котором происходит остановка коллапса. На рис. 1 $\Delta z = 28$ мм.

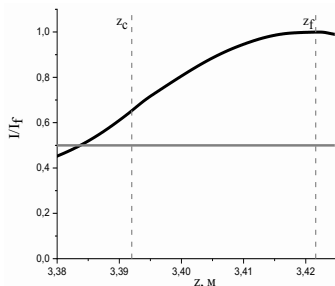


Рис. 1. Зависимость интенсивности, нормированной на пиковую интенсивность в фокусе, вдоль трассы, горизонтальной линией отмечено теоретическое значение

Различие в результатах можно объяснить сложностью достижения высокой точности при численных расчётах интенсивности вблизи нелинейного фокуса.

Список литературы

1. Self-focusing: past and present. Fundamentals and prospects / ed. by R.W. Boyd, S.G. Lukishova, Y.R. Shen. Berlin: Springer, 2008.
2. Землянов А.А., Минина О.В. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36.
3. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Минина О.В. // Оптика атм. и океана. 2018. Т. 31. С. 364.
4. Кандидов В.П., Федоров В.Ю., Тверской О.В. и др. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. С. 382.

К.С. АНДРЕЙЧИКОВ¹, Е.Д. ВОВЧЕНКО, И.А. ГЕРАСИМОВ,
А.П. МЕЛЕХОВ, Р.Ш. РАМАКОТИ, С.В. САЕНКО,
Г.Х. САЛАХУТДИНОВ, В.Г. СРЕДИН²

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

¹*АО «Московский завод «Сапфир»*

²*Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха*

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ НА ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ИНДИЯ

Методом вольт-фарадных характеристик исследовано воздействие мягкого рентгеновского излучения на поверхность плёночных структур на основе InSb.

K.S. ANDREICHIKOV¹, E.D. VOVCHENKO, I.A. GERASIMOV,
A.P. MELEKHOV, R.Sh. RAMAKOTI, S.V. SAENKO,
G.H. SALAKHUTDINOV, V.G. SREDIN²

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

¹*Joint-Stock Company «Moscow Plant «Sapphire»*

²*Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter the Great, Balashikha*

EFFECT OF SOFT X-RAY RADIATION ON THE CAPACITOR-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF INDIUM ANTIMONIDE FILMS

The capacitance-voltage characteristics method was used to study the action of Soft X-ray on the surface of film structures based on InSb.

Надежность и стабильность работы современных фотоприёмников инфракрасного излучения является чрезвычайно важны в системах обнаружения и идентификация источников теплового излучения.

В настоящей работе лазерно-искровой источник мягкого рентгеновского излучения (далее МРИ) [1] был использован для облучения полупроводниковых структур на основе антимонида индия (InSb). Методом ТЛД измерен спектр МРИ [2]. Измерения показали, что основная доля энергии МРИ (> 90 %) сосредоточена в диапазоне энергий квантов рентгеновского излучения $E_{\text{мри}} = 0.1 \div 3$ кэВ.

InSb используется для производства матричных фотоприёмников в ближней ИК-области спектра (3 ÷ 5 мкм). Как показывает практика, со

временем в фотоприёмниках на основе InSb образуется избыточный положительный поверхностный заряд, который значительно ухудшает его характеристики. Однако влияние этого эффекта может быть снижено, если в приповерхностном фоточувствительном слое InSb создать область с высоким электрическим сопротивлением, экранирующую избыточный поверхностный заряд. Например, это может быть область, насыщенная различными дефектами, снижающими удельную проводимость InSb.

Для создания экранирующего слоя поверхность плёнки была облучена МРИ, проникающим в приповерхностный слой на глубину порядка 100 Å [3]. После облучения проведён сравнительный анализ вольт-фарадных характеристик (ВФХ) облучённой и необлучённой областей поверхности. Результаты исследования методом ВФХ плёночных структур на основе InSb представлены на рис. 1. Время облучения составляло 15, 30 и 60 мин.

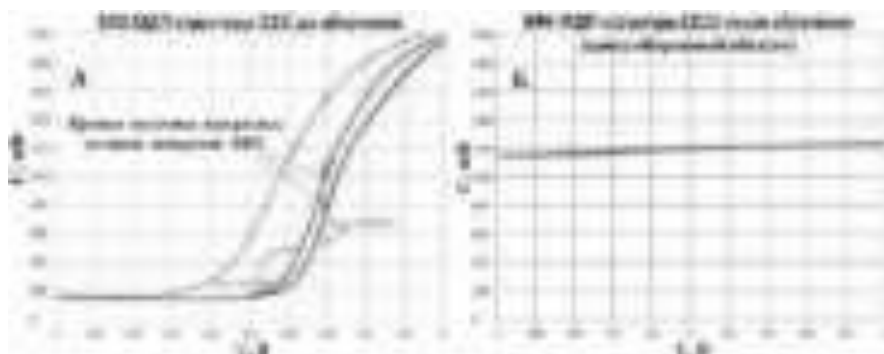


Рис. 1. ВФХ необлученной области МДП-структуры на основе InSb (А); ВФХ центра МДП-структуры после облучения в течение 60 мин. (Б), (211) – кристаллографическая ориентация поверхности

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что существует дозовая зависимость свойств облученных плёнок InSb, то есть поглощение МРИ приводит к генерации в материале радиационных дефектов, концентрация которых увеличивается с ростом дозы. Максимальный эффект, при котором вид ВФХ близок к прямой (рис. 1Б), достигается при шестидесятиминутном облучении образца.

Список литературы

1. Melekhov A.P., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 737. P. 012013.
2. Баловнев А.В., Григорьева И.Г., Салахутдинов Г.Х. // ПТЭ. 2018. № 1. С. 84-86.
3. Средин В.Г., Войцеховский А.В., Ананьин О.Б., Мелехов А.П., Несмелов С.Н., Дзядх С.М. // Прикладная физика. 2018. № 4.С. 54-60.

М.Д. МОЖАЕВА^{1,2}, А.А. КОРШУНОВ^{1,2}, А.А. ГАРМАТИНА^{2,3},
В.М. ГОРДИЕНКО², Ю.М. ДЫМШИЦ², В.В. КОЛДАЕВ²,
И.Г. ДЬЯЧКОВА², В.Е. АСАДЧИКОВ², Н.В. МИНАЕВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

⁴Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк

ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОСТРОСФОКУСИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА МЕДНУЮ МИШЕНЬ: К СОЗДАНИЮ МИКРОФОКУСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

Получено тормозное и характеристическое рентгеновское излучение из плазмы на поверхности медной мишени при воздействии на неё высокочастотного фемтосекундного волоконного лазера. Приведены результаты исследования зависимости выхода рентгеновских фотонов от лазерной энергии.

M.D. MOZHAJEVA^{1,2}, A.A. KORSHUNOV^{1,2}, A.A. GARMATINA^{2,3},
V.M. GORDIENKO², Yu.M. DYMSHITS², V.V. KOLDAEV²,
I.G. DYACHKOVA², V.E. ASADCHIKOV², N.V. MINAEV⁴

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics»
of the RAS, Moscow

³National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow

⁴Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk

GENERATION OF X-RAY PULSES WHEN EXPOSED TO THE SHARP-FOCUSED RADIATION OF A FIBER LASER ON A COPPER TARGET: TOWARDS THE CREATION OF A MICROFOCUS X-RAY SOURCE

Braking and characteristic X-ray radiation was obtained from plasma on the surface of a copper target when exposed to a high-frequency femtosecond fiber laser. The results of the dependence of the output of X-ray photons on the laser energy are presented.

Для исследования внутренней структуры объектов с помощью рентгеновского излучения (РИ) методом фазо-контрастная рентгенография [1] необходимо создание микрофокусного рентгеновского источника.

Целью представляемой работы является исследование зависимости выхода рентгеновских фотонов от лазерной энергии при воздействии излучения фемтосекундного волоконного лазера на медную мишень (рис. 1) с целью создания микрофокусного рентгеновского источника.

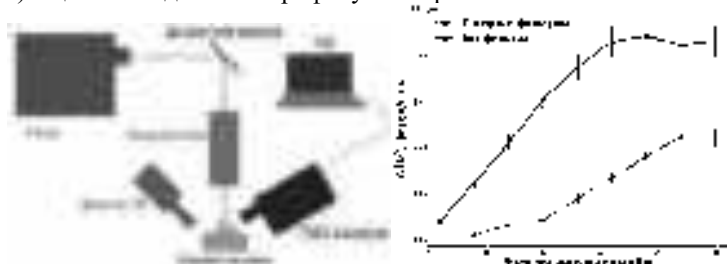


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (слева) и эффективность генерации РИ в различных режимах (справа)

Параметры использованного лазерного источника: $\lambda = 1030$ нм, максимальная энергия в импульсе 30 мкДж, средняя мощность до 10 Вт, минимальная длительность импульсов 280 фс, $M^2 = 1.2$, f до 400 кГц.

Было зарегистрировано тормозное и характеристическое рентгеновское излучение из плазмы на поверхности мишени, имеющее степенную зависимость от лазерной энергии с показателем степени ~ 3 .

Обнаружено, что при отсутствии медного фильтра толщиной 50 мкм, располагаемого на сцинтилляционном детекторе РИ, отмечается насыщение эффективности генерации РИ после 20 мкДж, тогда как с фильтром насыщение наступало после энергии 27 мкДж. Предполагается, что это связано с ионизацией воздуха и поглощением недостаточно энергичных фотонов (относящихся к тормозному спектру) на фильтре.

При этом при максимальном значении лазерной энергии 30 мкДж и частоте воздействия 100 кГц выход рентгеновских фотонов достигает величины порядка 10^8 фот/с/2π. При увеличении частоты воздействия до 400 кГц выход возрос пропорционально частоте и составил 10^9 фот/с/2π, что согласуется с данными, получаемыми с помощью миллиджоульных лазерных систем [2, 3].

Список литературы

1. Петраков А.П. // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 5. С 84-85.
2. Martín L., Benlliure J., et al. // Physica Medica. 2021. V. 82. P. 164-166.
3. Ivanov K.A., Gavrilin I.M., et al., // Laser Physics Letters. V. 18 (7). P. 075401.

А.А. КОРШУНОВ^{1,2}, М.Д. МОЖАЕВА^{1,2}, А.А. ГАРМАТИНА^{2,3},
В.М. ГОРДИЕНКО², Ю.М. ДЫМШИЦ², В.В. КОЛДАЕВ²,
И.Г. ДЬЯЧКОВА², В.Е. АСАДЧИКОВ², Н.В. МИНАЕВ⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

³Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

⁴Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк

ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ИСТОЧНИКА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С ОЦЕНКОЙ РАЗМЕРА ИСТОЧНИКА

Описаны технические аспекты разработки источника характеристического рентгеновского излучения на основе фемтосекундного волоконного лазера. Приведены результаты измерения кратера абляции медной мишени, которые характеризуют размер источника характеристического рентгеновского излучения.

A.A. KORSHUNOV^{1,2}, M.D. MOZHAJEVA^{1,2}, A.A. GARMATINA^{2,3},
V.M. GORDIENKO², Yu.M. DYMSHITS², V.V. KOLDAEV²,
I.G. DYACHKOVA², V.E. ASADCHIKOV², N.V. MINAEV⁴

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

²Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics»
of the RAS, Moscow

³National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow

⁴Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk

TECHNICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF CHARACTERISTICS X-RAY EMISSION SOURCE BASED ON LOW-ENERGY FEMTOSECOND FIBER LASER WITH THE ESTIMATION OF SOURCE'S SIZE

Described technical aspects of the development of characteristics X-ray emission source based on low-energy femtosecond fibre laser. Listed results of measurement of ablation crater of copper target, that determine the size of characteristics X-ray emission source.

В настоящее время актуальной задачей является создание микрофокусного источника рентгеновского излучения для нужд рентгеновской рентгенографии [1]. Для получения изображений необходим источник минимального размера, с высоким выходом рентгеновских фотонов.

Целью представляемой работы является разработка мишенного узла позволяющего создать микрофокусный источник на базе остророфокусированного на мишень волоконного лазерного излучения, с долгим временем работы и высокой стабильностью сигнала, а также оценка размера рентгеновского источника.

В экспериментах использовался фемтосекундный иттербиевый волоконный лазер ANTAUS-10W-40ц/250К («Авеста-проект», Троицк, Россия) с аналогичной длиной волны излучения, максимальной энергией в импульсе до 30 мкДж, средней мощностью до 10 Вт, минимальной длительностью импульсов 280 фс, качество излучения $M^2 = 1.2$. Излучение фокусировалось микроскопическим объективом с фокусным расстоянием $f = 10$ мм.

Для данной задачи был изготовлен мишенный узел, состоящий из медного цилиндра, вращающегося и циклично перемещаемого по вертикали с постоянной скоростью (диаметром 50 мм, толщиной 10 мм), мишень в виде цилиндра размещалась на моторе от квадрокоптера, который вращался с частотой ~ 2500 оборотов в секунду. Для юстировки положения мишени в пространстве использовалась многокоординатная система моторизированных подвижек. Так как размер рентгеновского источника при используемых интенсивностях порядка 10^{14} Вт/см² должен быть сопоставим с размером лазерной перетяжки, нами были проведены её измерения по кратерам в медной мишени и в кристалле сапфира, обладающего большим порогом абляции при разной лазерной энергии [2]. Оцененный таким образом размер источника оказался не более 6 мкм при лазерной энергии 30 мкДж. При этом разработанный мишенный узел позволил создать источник работающий менее десяти часов при потоке характеристических фотонов меди порядка 10^9 Вт/см².

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по гранту № 075-15-2021-1362.

Список литературы

1. Петраков А.П. Рентгеновский метод фазового контраста и демонстрация применения его для исследования кровеносных сосудов на модельном объекте // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 5. С 84-85.
2. Leitz K.-H., Redlingshöfer B., Reg Y., Otto A., Schmidt M. Metal ablation with short and ultrashort laser pulses // Physics Procedia. 2011. V. 12. P. 230-238.

А.В. ВАСИЛЬЕВА, А.К. КАРЕВА¹, В.А. ПАРФЕНОВ
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова

¹Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия им. А.Л. Штиглица

КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ОЧИСТКИ МНОГОСЛОЙНОГО ОКРАШЕННОГО ГИПСОВОГО БАРЕЛЬЕФА

Разработана комбинированная методика очистки фрагмента барельефа XVIII века с внутреннего фасада здания Санкт-Петербургской академии художеств. УФ-съёмка и энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия показали, что на поверхности барельефа было несколько слоёв краски, однако историческую ценность представляли только внутренние слои краски терракотового цвета. Исторические слои были покрыты несколькими слоями белой краски и гипса в результате неоднократных реставрационных работ в разные исторические периоды. Традиционный метод очистки с использованием химических растворителей не продемонстрировал желаемого результата, так как поверхностный слой белой краски обладал высокой устойчивостью к химическим растворителям. Поэтому было принято решение разработать комплексный метод очистки с использованием технологий лазерной очистки и традиционной химической и механической очистки.

A. V. VASILIEVA, A. K. KAREVA¹, V. A. PARFENOV

Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

¹Saint-Petersburg State Academy of Art and Industry named after A.L. Stieglitz

COMBINED METHOD OF CLEANING A MULTILAYER PAINTED GYPSUM BAS-RELIEF

A combined cleaning technology has been developed for a bas-relief fragment of the 18th-century bas-relief from the courtyard facade of the Saint-Petersburg Academy of Arts building. UV shooting and energy-dispersive X-ray spectroscopy showed that there were several paint layers on the surface of the bas-relief, however, only the inner layers of terracotta-colored paint were of historical value. The historical layers were covered with several layers of white paint and gypsum, as the result of repeated renovations of the bas-relief in different historical periods. The traditional cleaning method using chemical solvents did not demonstrate the desired result, since the surface layer of white paint was highly resistant to chemical solvents. Therefore, it was decided to carry out a complex cleaning method using laser cleaning technology and traditional chemical and mechanical cleaning.

Лазерная очистка сегодня активно применяется при реставрации объектов культурного наследия и показывает эффективные результаты при очистке каменных памятников и металлических предметов [1]. Наибольшее распространение получил импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с длиной волны 1064 нм [1, 2]. Помимо очистки металлических и каменных изделий известны примеры использования Nd:YAG-лазеров при реставрации настенных росписей и каменных поверхностей с декоративными слоями краски [3], а также гипсовых изделий, покрытых чёрными гипсовыми корками [4, 5].

Успешные примеры применения данного типа лазера в области реставрации и сохранения культурного наследия позволили предположить его потенциальное использование для решения задач данного исследования, так как рассматриваемый в работе барельеф является сложным многослойным объектом, поверхность которого неоднородна и имеет включения белых слоёв краски и гипсовых корок, которые слабо поддаются химическому воздействию даже сильных растворителей. Поэтому целью данного исследования было разработать такую методику очистки, при которой удастся удалить плотные корки белых закрасок на поверхности и тёмные гипсовые корки, не повредив при этом внутренние слои исторической терракотовой краски.

После проведения стратиграфии и исследований образца микрошлифа, демонстрирующего расположение слоёв красок на барельефе, с помощью электронной сканирующей микроскопии был разработан комбинированный способ очистки гипсового барельефа от поверхностных слоёв краски и гипсовых корок с использованием химического растворителя диметилсульфоксида в сочетании с технологией лазерной очистки. Был выбран режим лазерного воздействия на белую краску, при котором происходила деструктуризация поверхности плотной белой корки, после чего растворитель проникал вглубь и вступал в реакцию с приповерхностными слоями. Сравнительный анализ с участком, очищенным традиционным методом, показал, что участок, очищенный комбинированным способом, имел более равномерный цвет без видимых повреждений поверхности.

Список литературы

1. Cooper M. Laser cleaning in conservation. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
2. Siano S., Agresti J., Cacciari I., et al. // Applied Physics A. 2012. V. 106. P. 419-446.
3. Science and Art: The Painted Surface. The Royal Society of Chemistry, UK, 2014.
4. Siano S., Giamello M., Bartoli L., et al. // Laser Physics. 2008. V. 18 (1). P. 27-36.
5. Grammatikakis G., Demadis K.D., Melessanaki K., et al. // Studies in Conservation. 2015. V. 60 (1). P. S3-S11.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО¹, Л.В. МАРКОВА¹,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА
НАНОПОРОШКОВ-ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОКЕРАМИК ТИПА $MgAl_2O_4$, ДОПИРОВАННЫХ Fe,
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СПЛАВЫ АМг2 И Мг95
СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Проведено исследование процессов получения нанопорошков и наноплёнок, состоящих из смешанных оксидов Al и Mg допированных Fe при последовательном воздействии сдвоенных лазерных импульсов энергией 53 мДж и между импульсным интервалом 10 мкс на гибридную мишень, состоящую из пластинок алюминия марки АМг2 и магния марки Мг 95, склеенных между собой. Показана возможность получения прекурсоров для изготовления прозрачной нанокерамики типа $MgAl_2O_4$ допированной Fe.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO¹, L.V. MARKOVA¹,
L.S. RUTKOVSKAYA, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**STUDIES OF THE SYNTHESIS OF PRECURSOR
NANOPOWDERS FOR THE PRODUCTION
OF NANOCERAMICS OF THE $MgAl_2O_4$ TYPE DOPED
WITH Fe WHEN EXPOSED TO AMg2 AND Mg95 ALLOYS
BY DOUBLE LASER PULSES IN THE AIR ATMOSPHERE**

A study of the processes of obtaining nanopowders and nanofilms consisting of mixed oxides of Al and Mg doped with Fe under the sequential action of twin laser pulses with an energy of 53 mJ and between a pulse interval of 10 microseconds on a hybrid target consisting of plates of aluminum grade AMg2 and magnesium grade Mg95 glued together. The possibility of obtaining precursors for the manufacture of transparent nanoceramics of the $MgAl_2O_4$ type doped with Fe is shown.

Перспективным материалом для активных элементов лазеров с длиной волны излучения 2 - 5 мкм является нанокерамика на основе

магний-алюминиевой шпинели $MgAl_2O_4$, прозрачная в диапазоне 2.5 - 6.5 мкм. допированная двухвалентными ионами железа Fe^{2+} . Хорошим прекурсором являются нанопорошки, синтезированные в лазерном факеле. Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения прекурсоров для изготовления нанокерамики типа $MgAl_2O_4$ допированной ионами железа методом последовательной абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере гибридной мишени, состоящей из пластинок сплавов алюминия AMg_2 ($Fe - 0,5\%$) и магния $Mg95$, склеенных между собой. Образование кластеров $Fe_xMgAl_2O_4$ происходит за счёт реакции слипания различных субоксидов AlO , оксидов Fe и Mg при их турбулентном перемешивании на выходе из микроканала. В этом случае наличие наночастиц Al в порошке позволяют значительно снизить температуру спекания и улучшить качество нанокерамики.

Для проведения исследований использовали многоканальный лазерный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. На рис. 1а, в качестве примера, представлены результаты по зависимости интенсивности линий атомов Fe и Mg , ионов Al и полос AlO от количества импульсов. Энергия импульсов 53 мДж, межимпульсный интервал 10 мкс.

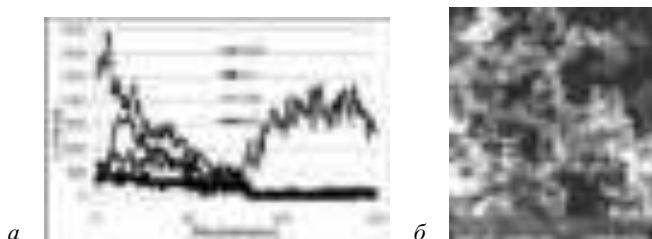


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображения наночастиц и агломератов из оксидов алюминия, магния и железа (б)

Для получения наночастиц Al и продуктов, образующихся при взаимодействии ионов алюминия, магния и железа с кислородом и азотом воздуха, использовался закрытый стеклянный бокс, куда помещалась гибридная мишень состоящая из последовательно склеенных между собой пластинок сплава алюминия AMg_2 и магния $Mg 95$ толщиной 0,7 мм. Облучение проводили сериями из 150 сдвоенных импульсов в течение 10 мин., количество точек 100. Изображения синтезированных наночастиц и агломератов, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения MIRA3 приведены на рис. 1б.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО¹, Л.В. МАРКОВА¹,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА
НАНОПЛЁНОК-ПРЕКУРСОРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОКЕРАМИК ТИПА CuAlO_2 , ДОПИРОВАННЫХ Mg,
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА СПЛАВЫ AMg_2 И M_2
СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Проведено исследование процессов образования наноплёнок, состоящих из смешанных оксидов Al, Cu и Mg, при последовательном воздействии сдвоенных лазерных импульсов энергией 53 мДж и между импульсным интервалом 10 мкс на гибридную мишень, состоящую из пластинок алюминия марки AMg_2 и меди марки M_2 , склеенных между собой. Показана возможность получения прекурсоров для получения нанокерамик типа CuAlO_2 допированных Mg.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO¹, L.V. MARKOVA¹,
L.S. RUTKOVSKAYA, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**STUDIES OF THE PROCESSES OF SYNTHESIS
OF PRECURSOR NANOFILMS FOR THE PRODUCTION
OF CuAlO_2 -TYPE NANOCERAMICS DOPED WITH Mg
WHEN EXPOSED TO AMg_2 AND M_2 ALLOYS BY DOUBLE
LASER PULSES IN AN AIR ATMOSPHERE**

A study of the formation of nanofilms consisting of mixed oxides of Al, Cu and Mg was carried out under the sequential action of twin laser pulses with an energy of 53 mJ and between a pulse interval of 10 microseconds on a hybrid target consisting of plates of aluminum grade AMg_2 and copper grade M_2 , glued together. The possibility of obtaining precursors for the production of nanoceramics of the CuAlO_2 type doped with Mg is shown.

Нелегированный CuAlO_2 обладает p-типом проводимости. Основным фактором влияющих на качество материала является довольно низкая проводимость материалов. Для того чтобы повысить проводимость, число

зарядовых носителей может быть увеличено путём допирования исходного материала двухвалентными катионами Ca^{+2} , Mg^{+2} . В этом случае дырочная проводимость материала повышается.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения прекурсоров для изготовления нанокерамик типа $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ методом последовательной абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере гибридной мишени, состоящей из пластинок сплавов алюминия АМг2 и меди М2, склеенных между собой. Образование кластеров $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ происходит за счёт реакции слипания различных субоксидов AlO , оксидов Cu и Mg . Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. На рис. 1а, в качестве примера, представлены результаты по зависимости интенсивности линий атомов Cu и Mg , ионов Al и полос AlO от количества импульсов. Энергия импульсов 53 мДж, межимпульсный интервал 10 мкс.

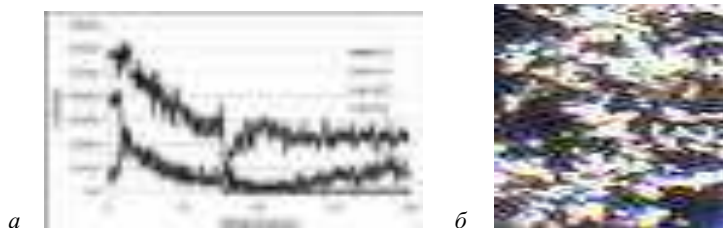


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображения наночастиц и агломератов из оксидов алюминия, магния и меди напылённых 150 импульсами на стеклянную подложку (б)

Напыление на поверхность стекла наночастиц оксидов алюминия, магния и меди исследовано при воздействии серии сдвоенных лазерных импульсов (150 импульсов) на гибридную мишень из (Al+Cu) установленную под углом 45° к падающему излучению и подложке на расстоянии 3 мм. Энергия импульсов излучения 53 мДж.

Изображения наночастиц и агломератов, синтезированных при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, приведены на рис. 1б. Видно, что плёнка имеет пёструю структуру. Белые шарики – смешанные оксиды алюминия Al_2O_3 и магния, чёрная плёнка – оксид меди CuO . средний размер шариков составляет примерно 1 - 2 мкм. Островки CuO состоят из кристаллитов размеров 20 - 30 нм.

Я.С. ЛЕБЕДЕВА, М.П. СМАЕВ¹, И.А. БУДАГОВСКИЙ¹,
П.И. ЛАЗАРЕНКО

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград
¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ЛАЗЕРНАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ТОНКИХ ПЛЁНОК АМОРФНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ И Sb_2Se_3

Исследована кристаллизация аморфных полупроводниковых плёнок $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ и Sb_2Se_3 в поле непрерывного лазерного излучения. Установлено, что кристаллизация плёнок одинаковой толщины происходит при близких плотностях мощности, однако закристаллизованные области Sb_2Se_3 характеризуются большей зернистостью, что может быть связано с различиями в механизмах лазерной кристаллизации.

Ya.S. LEBEDEVA, M.P. SMAYEV¹, I.A. BUDAGOVSKY¹,
P.I. LAZARENKO

National Research University of Electronic Technology, Zelenograd
¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

LASER CRYSTALLIZATION OF THIN FILMS OF $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ AND Sb_2Se_3 AMORPHOUS CHALCOGENIDES

The crystallization of amorphous semiconductor films $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ and Sb_2Se_3 in the field of cw laser radiation has been studied. It has been found that the crystallization of films of the same thickness occurs at similar power densities, but the crystallized Sb_2Se_3 regions are characterized by a larger grain size, which may be due to differences in the mechanisms of laser crystallization.

Сочетание простоты и обратимости межфазовых переключений в халькогенидных полупроводниках на основе $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ делает эти материалы перспективными для создания энергонезависимых многоуровневых устройств интегральной фотоники [1, 2]. Бинарное соединение Sb_2Se_3 характеризуется меньшим, поглощением в видимой области в сравнении с $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, что представляет особый интерес для создания пропускающих оптических элементов. В данной работе проводили сравнительные исследования лазерной кристаллизации этих материалов.

Тонкие (130 ÷ 150 нм) халькогенидные плёнки наносили на стеклянные подложки методом магнетронного распыления. Регистрировали спектры поглощения, которые затем использовали в расчёте оптической ширины

запрещённой зоны E_g методом Тауца [2]. Показано, что селенид сурьмы характеризуется большей величиной запрещённой зоны, как в кристаллической $E_g^{cr} = 0.82$ (Sb_2Se_3) и 0.30 ($Ge_2Sb_2Te_5$) эВ, так и в аморфной $E_g^{am} = 1.20$ (Sb_2Se_3) и 0.68 ($Ge_2Sb_2Te_5$) фазах.

Фотокристаллизация осуществлялась одночастотным лазером с длиной волны 532 нм, который фокусировался на тонкоплёночный образец в пятно с диаметром 80 мкм. Проведённый посредством оптической микроскопии анализ закристаллизованных областей показал, что минимальная пороговая мощность кристаллизации составляет 80 мВт для $Ge_2Sb_2Te_5$ и 95 мВт для Sb_2Se_3 . Мощности близки по значению, но на закристаллизованные области плёнок отличаются по однородности распределения интенсивности отражённого света, которая оценивалась с помощью спектров пространственных частот при разложении изображений в двумерный спектр Фурье (рис. 1). Показано, что кристаллическая фаза Sb_2Se_3 характеризуется наиболее широким спектром пространственных частот (характерный масштаб неоднородностей $\Lambda = 0.8$ мкм). Тонкие плёнки $Ge_2Sb_2Te_5$ обладают более высокой степенью однородности закристаллизованной поверхности, что может быть объяснено различием в механизмах лазерной кристаллизации: в селениде сурьмы преобладает процесс роста кристаллитов, в то время как в плёнке $Ge_2Sb_2Te_5$ преобладает зародышеобразование.



Рис. 1. Амплитуды двумерного преобразования Фурье закристаллизованных областей для $Ge_2Sb_2Te_5$ (а) и Sb_2Se_3 (б), Λ – масштаб неоднородностей

Исследования проводились при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-03-2022-212/4 от 08.11.2022 г., FSMR-2022-0001).

Список литературы

1. Cao T., Cen M. // Adv. Theory Simul. 2019. V. 2 (8). P. 1-17.
2. Козюхин С.А. и др. // Успехи Химии. 2022. Т. 91. № 9. RCR 5033.
3. Tauc J., Grigorovici R., Vancu A. // Phys. status solidi. 1966. V. 15 (2). P. 627-637.

Н.А. ОРЕХОВА¹, А.О. ПУХТЕЕВ¹, Р.А. ХАРИТОНЧИК¹,
А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВЫХ ФАЗ В МЕТЕОРИТЕ БРАГИН МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО- ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии изучено распределение железа и никеля в образце метеорита Брагин. Анализ результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеорите трёх типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных.

N.A. AREKHAVA¹, A.O. PUKHTEEV¹, R.A. CHARITONCHIK¹,
A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

STUDY OF THE DISTRIBUTION OF IRON-NICKEL PHASES IN THE BRAGIN METEORITE BY LASER ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY

The distribution of iron and nickel in a sample of the Bragin meteorite was studied by laser atomic emission multichannel spectrometry. The analysis of the results allows us to make an assumption about the presence of three types of octahedrites in the meteorite: medium-, coarse- and very coarse-structured.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. По составу все метеориты делят на три группы: каменные, железокремнистые, железные. Железосиликатные метеориты состоят из примерно равных частей каменного (силикатного) и железистого (металлического) материала и представлены в основном двумя классами: мезосидериты и палласиты. Метеорит Брагин относится к классу палласитов. Несмотря на то, что железо-каменный метеорит Брагин изучается более двухсот лет, он до сих пор остается плохо изученным [1]. Самым распространённым минералом каменной части являются оливин, а железоникелевой части – камасит. Метеориты с валовым содержанием

Ni 6 - 16 мас. % и к которым относится Брагин имеют видманштеттенову структуру и называются октаэдритами. Они образованы пересекающимися пластинами камасита, ориентированными по плоскостям октаэдра (111) в тэните. Толщина камаситовых балок связана обратной зависимостью с валовым содержанием Ni и является основой для более детального подразделения октаэдритов на тонко-, средне- и грубо- и весьма грубоструктурные октаэдриты, с примерными размерами балок 0,6, 0,6 - 1,3, 1,3 - 3,3 и более 3,3 мм.

Целью настоящей работы являлась оценка распределения железа и никеля по поверхности и глубине железоникелевых включений метеорита Брагин методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (рис. 1а, светлые области). Для анализа использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Длительность импульсов ≈ 15 нс. Лазерное излучение фокусируется на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки ≈ 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Количество удвоенных импульсов на точку – 20.

На рис. 1б и 1в представлены зависимости отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах метеорита Брагин и образца сравнения. Расстояние между точками $\approx 0,5$ мм. В качестве образца сравнения использована пластинка нержавеющей стали марки А2 (прокат). Содержание железа 65 - 70 %, никеля 10 - 12 %.

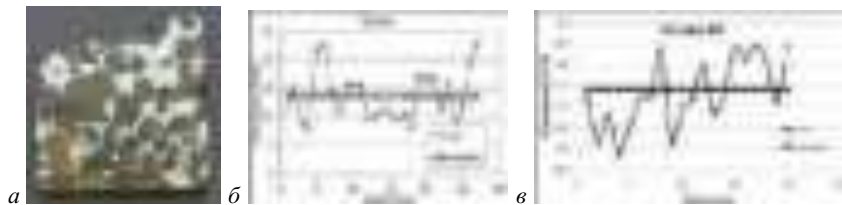


Рис. 1. Снимок поверхности образца (а); отношение интенсивностей линий Fe/Ni в образцах (б) и (в)

Анализ приведённых на рис. 1б результатов позволяет сделать предположение о наличии в метеорите трёх типов октаэдритов: средне-, грубо- и весьма грубоструктурных. В образце сравнения существенных отличий не наблюдается, что свидетельствует о более-менее однородном распределении атомов железа и никеля.

Список литературы

1. Бахтин А.И., Ескин А.А., Сунгатуллин Р.Х. и др. // Ученые записки Казан. ун-та. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 2. С. 324-338.

Н.А. ОРЕХОВА¹, А.О. ПУХТЕЕВ¹, Р.А. ХАРИТОНЧИК¹,
А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Средняя школа № 64, Минск, Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦА ЖЕЛЕЗНОГО МЕТЕОРИТА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектроскопии изучено распределение железа и никеля в образце железного метеорита. Полученные данные, с большой вероятностью, подтверждают внеземное происхождение метеорита и его связь с падениями обломков более крупного тела и которые были найдены вскоре после их падения на Землю.

N.A. AREKHAVA¹, A.O. PUKHTEEV¹, R.A. CHARITONCHIK¹,
A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Secondary School No. 64, Minsk, Belarus

INVESTIGATIONS OF AN IRON METEORITE SAMPLE BY LASER ATOMIC EMISSION MULTICHANNEL SPECTROMETRY

The distribution of iron and nickel in a sample of iron meteorite was studied by laser atomic emission multichannel spectrometry. The data obtained, with a high probability, confirm the extraterrestrial origin of the meteorite and its connection with the falling fragments of a larger body and which were found shortly after their fall to Earth.

Метеориты были и, несмотря на интенсивное развитие космических исследований, остаются ключевым, а часто и единственным источником информации о протопланетной и ранней планетной истории Солнечной системы. Современные исследования в области метеоритики, космохимии и планетологии свидетельствуют о существенной роли ударного метаморфизма в формировании и преобразовании космического вещества. Изучение признаков ударного метаморфизма в железных метеоритах позволяет получить сведения о характере структурно-минералогических и химических изменений метеоритного вещества как на ранних этапах

развития малых дифференцированных тел Солнечной системы, так и на современном этапе в результате его дробления и падения на Землю.

Целью настоящей работы являлось изучение природы неизвестного железного образца метеорита путём оценки распределения железа и никеля по поверхности и глубине головной части и среза метеорита методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Для анализа использовался лазерный атомно-эмиссионный многоканальный спектрометр LSS-1. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм. Энергия импульсов 35 мДж. Количество сдвоенных импульсов 50. Для анализа использованы интенсивности линий Fe (404,58 нм) и Ni (349,3 нм).

Снимки неизвестного образца приведены на рис. 1а. На рис. 1б представлены зависимости отношения интенсивностей линий Fe и Ni в спектрах головной части метеорита от номера импульса (среднее для трёх точек – на вершине и двух впадинах) и на рис. 1в от номера точки на поверхности среза.



Рис. 1. Снимок поверхности образца (а); отношение интенсивностей линий Fe/Ni в различных частях образца (б) и (в)

Образец характеризуется уплощённо-каплевидной формой и типичной регмаглиптовой скульптурой поверхности. В связи с тем, что образец имеет явные следы плавления с образованием красивой волнообразной коры серо-фиолетового оттенка, характерной для других железных метеоритов можно сделать вывод о том, что он является частью более крупного метеорита, расколовшегося на первой стадии падения.

Анализ приведённых на рис. 1б результатов позволяет сделать вывод о том, что кора плавления преимущественно состоит из железа, а в более глубоких слоях количество никеля существенно увеличивается. Анализ приведённых на рис. 1в результатов распределения железа и никеля в срезе позволяет сделать предположение о наличии в объёме образца трёх типов октаэдритов: средне- и грубо- и весьма грубоструктурных. Концентрация никеля во всех точках меньше чем в головной части, что может свидетельствовать о наличии факта миграции никеля при плавлении обтекаемой воздухом головной части.

А.А. ОЛЬХОВА, А.А. ПАТРИКЕЕВА, М.А. ДУБКОВА,
М.М. СЕРГЕЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПЛЁНОК PbSe НЕПРЕРЫВНЫМ И ИМПУЛЬСНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ
ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТЕКТОРА
ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ ГАЗОВОГО АНАЛИЗА**

В работе показано влияние лазерного облучения халькогенидных плёнок PbSe на их оптические характеристики в результате необратимой модификации структуры. Исследованы особенности модификации структуры и свойств плёнок под действием непрерывного излучения (CW) с длиной волны 405 нм и наносекундных лазерных импульсов с длиной волны 1064 нм.

A.A. OLKHOVA, A.A. PATRIKEEVA, M.A. DUBKOVA,
M.M. SERGEEV

ITMO University, Saint-Petersburg

**SEMICONDUCTOR PbSe FILMS LASER PROCESSING
BY CONTINUOUS AND IMPULSE IRRADIATION
TO IMPROVE DETECTOR PHOTSENSITIVE
CHARACTERISTICS FOR GAS ANALYZING APPLICATIONS**

The paper shows the laser irradiation effect of PbSe chalcogenide films on their optical characteristics as a result of structural irreversible modification. The features of the film structure and properties modification under the action of continuous wave radiation (CW) with a wavelength 405 nm and nanosecond laser pulses with a wavelength 1064 nm are studied.

Благодаря высокому поглощению в ближней ИК-области спектра и низкому электрическому сопротивлению халькогенидные плёнки селенида свинца находят применение в различных областях оптики и оптоэлектроники [1]. Уникальные свойства таких плёнок позволяют использовать их для фотодетектирования органических веществ в виде газов и жидкостей [2 - 4]. Изучение возможности управляемой модификации оптических и электрических характеристик таких материалов становится всё более популярным для различных приложений,

например, в солнечных элементах, фотоэлектрических датчиках и фотовольтаике [5].

Коррекция оптических и электрических свойств плёнок PbSe в большинстве технологических процессов осуществляется термообработкой в печи. Этот вид обработки активизирует рост новой оксидной фазы в плёнке, что приводит к её просветлению. Ранее было показано, что термосенсибилизация в диапазоне температур 648 - 698 К может увеличивать фотоотклик плёнок PbSe на ИК-излучение.

Процесс термообработки в печи трудно контролировать, поэтому в последние годы для модификации плёнки с целью коррекции её светочувствительности всё чаще используют лазерное излучение. Например, в результате лазерного воздействия фемтосекундными импульсами лазерного излучения с длиной волны 800 нм наблюдалось снижение показателя преломления плёнок GeSbSe на 0,02 - 0,08.

Лазерные технологии позволяют значительно упростить условия модификации халькогенидных плёнок и скорректировать их характеристики в узком диапазоне значений. Эта возможность открывает перспективы для создания новых фоточувствительных элементов с более широкими функциональными возможностями в оптоэлектронике.

В результате исследования, после лазерной обработки наблюдалось снижение сопротивления плёнок в несколько раз, что особенно важно для светодиодной техники и фотовольтаики.

В представленном исследовании модификация структуры и оптических характеристик осуществлялась как непрерывным излучением, так и наносекундными лазерными импульсами ближнего ИК-излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 19-79-10208).

Список литературы

1. Sati D.C., Jain H. Coexistence of photodarkening and photobleaching in Ge-Sb-Se thin films // Journal of Non-Crystalline Solids. 2017. V. 478. P. 23-28.
2. Ren Y.X., Dai T.J., Luo W.B., Liu X.Z. Evidences of sensitization mechanism for PbSe thin films photoconductor // Vacuum. 2018. V. 149. P. 190-194.
3. Grayer J.S., Ganguly S., Yoo S.-S. Embedded surface plasmon resonant disc arrays for improved MWIR sensitivity and increased operating temperature of PbSe photoconductive detectors // Proceedings of SPIE. 2019. V. 11082. P. 106-115.
4. Weng B., Qiu J., Yuan Z., Larson P.R., Strout G.W., Shi Z. Responsivity enhancement of mid-infrared PbSe detectors using CaF₂ nano-structured anti-reflective coatings // Applied Physics Letters. 2014. V. 104. No. 2. P. 021109.
5. Weng B., Qiu J., Zhao L., Yuan Z., Chang C., Shi Z. Recent development on the uncooled mid-infrared PbSe detectors with high detectivity // Proceedings of SPIE. 2014. V. 8993. P. 178-185.

А.Н. ЕГОРОВ, О.Б. МАВРИЦКИЙ, М.С. ХОЛИНА,
А.В. ЗЕНКЕВИЧ¹, Н.О. ВОЛОДИНА¹

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ HZO

Приведено описание математической модели для расчёта динамики температурных профилей в многослойной структуре сегнетоэлектрической ячейки памяти при импульсном лазерном отжиге, представлены примеры результатов расчёта для различных параметров структуры и режимов облучения.

A.N. EGOROV, O.B. MAVRITSKII, M.S. KHOLINA,
A.V. ZENKEVICH¹, N.O. VOLODINA¹

*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University)*

MODELING OF PULSED LASER ANNEALING OF HZO-BASED FERROELECTRIC STRUCTURES

The mathematical model for calculation of temperature profile evolution in the multi-layer ferroelectric memory cell during pulsed laser annealing is described. The examples of the calculation results for various structure parameters and irradiation regimes are presented.

В последнее время существенно возрос интерес к созданию энергонезависимых запоминающих устройств на основе сегнетоэлектрического эффекта (FeRAM). Одним из наиболее перспективных сегнетоэлектрических материалов, используемых при создании FeRAM, является HZO – сплав оксидов гафния и циркония в $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ стехиометрии, для кристаллизации которого в сегнетоэлектрической фазе обычно используется быстрый термический отжиг (RTA), заключающийся в резком нагреве HZO до температуры более 400 °С и его последующем охлаждении за счёт теплопроводности.

В опубликованных к настоящему времени экспериментальных работах ([1] и ссылки в этой статье) показано, что для осуществления RTA целесообразно использовать импульсное лазерное излучение длительностью от сотен наносекунд до десятков микросекунд. В данной

работе методом математического моделирования сделана попытка определить параметры лазерного излучения (плотность мощности, длительность импульса), требуемые для достижения оптимального нагрева, а также оценить возможность использования для импульсного термического отжига последовательности (цуга) фемтосекундных лазерных импульсов с регулируемой длительностью цуга.

Моделируемая сегнетоэлектрическая ячейка представляет собой многослойную структуру (рис. 1) из тонких слоёв нитрида титана TiN, HZO и оксида кремния SiO₂ на кремниевой подложке. Данная структура подвергалась воздействию сфокусированного в пятно микронных размеров лазерного пучка (размер выбирался исходя из технологических параметров реальных сегнетоэлектрических ячеек). При моделировании использовались фундаментальные соотношения, описывающие процессы поглощения и отражения лазерного излучения, а также охлаждения за счёт теплопроводности. Расчёты производились в пакете COMSOL 6.0.

На рис. 2 представлен результат расчёта динамики нагрева и охлаждения слоёв структуры при воздействии цуга фемтосекундных лазерных импульсов со средней плотностью мощности в фокусе ~ 2 МВт/см². Видно, что при заданных размерах структуры (рис. 1) для достижения температуры отжига HZO выше 400 °С достаточно лазерного импульса с длительностью цуга ~ 1 мкс.



Рис. 1. Структура ячейки памяти на Si подложке

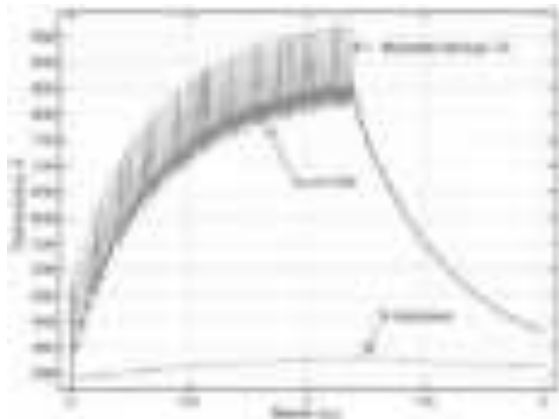


Рис. 2. Пример расчёта динамики температуры в различных слоях структуры

Список литературы

1. Volodina N., et al. Ferroelectric $\text{Hf}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{O}_2$ Thin films crystallized by pulsed laser annealing
// Physica Status Solidi (RRL) – Rapid Res. Lett. 2021 V. 15. No. 5. P. 2100082.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО¹, Е.С. ВОРОПАЙ,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЁНОЧНЫХ
РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННЫХ
ЦИНКОМ, ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ
И ЦИНКА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Изучены возможности получения газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди легированных оксидами цинка, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени состоящей из склеенных между собой пластинок из меди М2 и цинка Ц0 на подложку из стеклотекстолита в атмосфере воздуха. Резистор напыляется на дорожку шириной 300 мкм изготовленной в медной фольге на мишени из фольгированного стеклотекстолита. Оценены параметры чувствительности сенсора на аммиак, воду, уксусную кислоту.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO¹, E.S. VOROPAY,
L.S. RUTKOVSKYA, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF OBTAINING
GAS-SENSITIVE THIN-FILM RESISTORS FROM COPPER
OXIDES DOPED WITH ZINC DURING LASER SPRAYING
OF COPPER AND ZINC IN AN AIR ATMOSPHERE**

The possibilities of obtaining gas-sensitive nanofilm resistors from copper oxides doped with zinc oxides by ablation with double laser pulses of a hybrid target consisting of plates of copper M2 and zinc Z0 glued together on a fiberglass substrate in an air atmosphere have been studied. The resistor is sprayed onto a track 300 microns wide made in copper foil on a target made of foiled fiberglass. The sensitivity parameters of the sensor to ammonia, water, and acetic acid were evaluated.

Плёнки оксидов меди легированных цинком, оловом, железом и так далее хорошо зарекомендовали себя в качестве чувствительного слоя газовых сенсоров. Цель работы состояла в том, чтобы показать

возможность и определить условия для получения методом последовательного воздействия сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на гибридную мишень, состоящую из пластинок меди и цинка, в воздушной атмосфере наноплёнок из оксидов Cu легированных оксидами цинка для использования их в качестве газовых сенсоров. Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1.

Результаты исследований по зависимости интенсивности линии атомов Cu (522,0 нм) и Zn (481,2 нм) от количества импульсов для угла напыления 70^0 при последовательном воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень состоящую из склеенных между собой пластинок из меди М2 и цинка Ц0 на подложку из стеклотекстолита в атмосфере воздуха приведены на рис. 1а. Энергии импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Толщина медной пластинки 0,23 мм. Толщина цинковой пластинки 0,5 мм. Изменяя количество лазерных импульсов в серии возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных наноплёнок.



Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображение поверхности мишени после последовательного напыления оксидов меди и цинка – 150 импульсов (б); напыление на стекле (в)

Используя полученные выше результаты, мы провели исследования процессов напыления наноплёнок. Изображения поверхности мишени с напылёнными плёнками, полученные с помощью микроскопа Webbers, увеличение в 50 раз, приведены на рис. 1б. Изображения поверхности стекла с нанесённой плёнкой из 150 лазерных импульсов, увеличенные с помощью микроскопа Биолам в 375 раз, приведены на рис. 1в.

Начальное сопротивление плёнки с рис. 1б более 1 ГОм, при комнатной температуре. Исследована чувствительность плёнки к парам воды, аммиака и уксусной кислоты. Плёнка хорошо реагирует на пары NH_3 , относительно слабо на воду и практически не чувствует пары уксусной кислоты.

М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО¹, Е.С. ВОРОПАЙ,
Л.С. РУТКОВСКАЯ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск
¹Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ НАНОПЛЁНОЧНЫХ
РЕЗИСТОРОВ ИЗ ОКСИДОВ МЕДИ, ЛЕГИРОВАННЫХ
ЖЕЛЕЗОМ, ПРИ ЛАЗЕРНОМ РАСПЫЛЕНИИ МЕДИ
И ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Изучены возможности получения газочувствительных наноплёночных резисторов из оксидов меди легированных оксидами железа, методом абляции сдвоенными лазерными импульсами гибридной мишени состоящей из склеенных между собой пластинок из меди М2 и железа Ст 20 на подложку из стеклотекстолита в атмосфере воздуха. Резистор напыляется на дорожку шириной 300 мкм изготовленной в медной фольге на мишени из фольгированного стеклотекстолита. Оценены параметры чувствительности сенсора на аммиак, воду, уксусную кислоту.

M.N. KOVALENKO, N.A. ALEKSEENKO¹, E.S. VOROPAY,
L.S. RUTKOVSKYA, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk
¹Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

**INVESTIGATION OF THE PROCESSES OF OBTAINING
GAS-SENSITIVE NANOFILM RESISTORS FROM COPPER
OXIDES DOPED WITH IRON DURING LASER SPRAYING
OF COPPER AND IRON IN THE AIR ATMOSPHERE**

The possibilities of obtaining gas-sensitive nanofilm resistors from copper oxides doped with iron oxides by ablation with double laser pulses of a hybrid target consisting of plates of copper M2 and iron St 20 glued together on a fiberglass substrate in an air atmosphere have been studied. The resistor is sprayed onto a track 300 microns wide made in copper foil on a target made of foiled fiberglass. The sensitivity parameters of the sensor to ammonia, water, and acetic acid were evaluated.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом последовательного воздействия сериями сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов

на гибридную мишень, состоящую из пластинок меди и железа, в воздушной атмосфере наноплёнок из оксидов Cu легированный оксидами железа для использования их в качестве газовых сенсоров.

Для проведения исследований использовали многоканальный лазерный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Результаты исследований по зависимости интенсивности линии атомов Cu (522,0 нм) и Fe (438,35 нм) от количества импульсов для угла напыления 70° при последовательном воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень состоящую из склеенных между собой пластинок из меди М2 и железа Ст 20 на подложку из стеклотекстолита в атмосфере воздуха приведены на рис. 1а. Энергии импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Толщина медной пластинки 0,23 мм. Толщина стальной пластинки 1 мм. Изменяя количество лазерных импульсов в серии возможно целенаправленно менять состав прекурсоров для изготовления тех или иных наноплёнок.



Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображение поверхности мишени после последовательного напыления оксидов меди и железа сериями сдвоенных лазерных импульсов – 150 импульсов (б); напыление на стекле, увеличение в 375 раз (в)

Используя полученные выше результаты, мы провели исследования процессов напыления наноплёнок Энергия импульсов излучения 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс.

Изображения поверхности мишени с напылёнными плёнками, полученные с помощью микроскопа Webbers, увеличение 50 раз, приведены на рис. 1б. Изображения поверхности стекла с нанесёнными плёнками тремя сериями по 150 лазерных импульсов, увеличенные с помощью микроскопа Биолам в 375 раз, приведены на рис. 1в.

Начальное сопротивление плёнки с рис. 1б более 1 ГОм, при комнатной температуре. Исследована чувствительность плёнки к парам воды, аммиака и уксусной кислоты. Плёнка хорошо реагирует на пары NH_3 , относительно слабо на воду и практически не чувствует пары уксусной кислоты.

П.А. ТИТОВЕЦ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, А.А. СМОЛЬСКИЙ
Московский технический университет связи и информатики

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АДАПТИВНЫХ АНТЕНН С ЛАЗЕРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Создана экспериментальная установка для исследования характеристик элементов конфигурируемой плазменной антенны с лазерным управлением. Представлены результаты исследований коэффициентов отражения и прохождения для различных полупроводниковых элементов, которые предполагается использовать при создании адаптивных антенн и фазированных антенных решёток, с дистанционным лазерным управлением. Показано, что серийные фотодиоды и фоторезисторы могут эффективно применяться в контуре антенн и антенных решёток в спектральной области 0.9 - 3 ГГц.

P.A. TITOVETS, S.Yu. KAZANTSEV, A.A. SMOLSKII
Moscow Technical University of Communications and Informatics

FACILITY FOR INVESTIGATION OF ADAPTIVE ANTENNA ELEMENTS WITH LASER CONTROL

An experimental setup has been created to study the characteristics of the elements of a configurable plasma antenna with laser control. The results of studies of the reflection and transmission coefficients for various semiconductor elements, which are supposed to be used in the creation of adaptive antennas and phased antenna arrays, with remote laser control, are presented. It is shown that serial photodiodes and photoresistors can be effectively used in the circuit of antennas and antenna arrays in the spectral region of 0.9 - 3 GHz.

Известно, что плазменные каналы, сформированные газовой среде, могут применяться в качестве плазменных антенн [1]. С этой целью могут применяться тлеющие или ВЧ-разряды в диэлектрических трубках [2], либо плазменные каналы создаются лазерными импульсами в свободной атмосфере [3]. Однако плазменные антенны, создаваемые с помощью подобных методов, требуют значительных энергетических затрат на создание электрон-ионных пар, поэтому значительный интерес вызывает возможность применения в качестве антенн полупроводниковой плазмы, формируемой с помощью диодных лазеров, который был предложен в работе [4]. Исследования [5, 6] выявили ряд преимуществ, которые даёт применение дискретных полупроводниковых элементов в контуре антенны по сравнению с формированием плазменной антенны на

поверхности полупроводниковой пластины, а в работе [7] описана концепция конфигурируемой плазменной антенны, управляемой с помощью лазера. Целью настоящей работы являлось разработка стенда и методик исследований фоторезисторов и фотодиодов, выпускаемых серийно, для применения в контуре конфигурируемой плазменной антенны [7].

Схема экспериментального стенда показана на рис. 1а, где показаны: а - лазерный модуль; б - закреплённый на площадке фотоэлемент; с - коаксиальный кабель; d - векторный анализатор цепей. На рис. 1б и рис. 1в показаны, соответственно, частотные зависимости амплитуды и фазы коэффициента прохождения (S_{21} и S_{12}), полученные при разных интенсивностях облучения фоточувствительного слоя фотодиода SFH 203 P. Аналогичные зависимости получены для разных марок фоторезисторов и фотодиодов. Результаты тестирования этих элементов показали возможность их эффективного применения при создании адаптивных плазменных антенных систем с лазерным управлением.

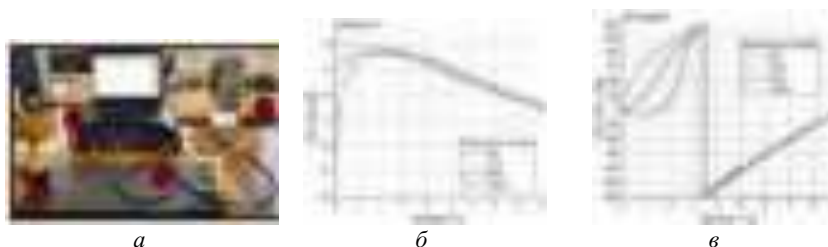


Рис. 1. Экспериментальный стенд (а); зависимости коэффициентов прохождения для фотодиода (б); зависимости фазы коэффициентов прохождения через фотодиод SFH 203 P (в)

Список литературы

1. Гусейн-Заде Н.Г. и др. // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 10. С. 1216-1220.
2. Тихонович О.В. и др. // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. № 2. С. 165-168.
3. Bogatov N.A., et al. // Quantum Electronics. 2009. V. 39 (10). P. 985.
4. Богачев Н.Н. и др. // Письма в Журнал технической физики. 2019. Т. 45. № 24. С. 6-9.
5. Brusentsev A.S., et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2103. P. 012187.
6. Казанцев С.Ю. и др. // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2021. Т. 12. № 1. С. 36-47.
7. Kazantsev S.Yu., et al. // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings. Moscow, 2022.

С.Е. МИНАЕВ^{1,2}, Е.Д. МИНАЕВА^{1,2}, Н.С. НИКИТИН^{3,4},
А.С. ГУЛЯШКО⁵, И.А. ЛАРИОНОВ⁵, В.А. ТЫРТЫШНЫЙ⁵,
Н.В. МИНАЕВ², В.И. ЮСУПОВ²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

³*Центр теоретических проблем физико-химической фармакологии РАН, Москва*

⁴*Российский национальный исследовательский медицинский университет
им. Н.И. Пирогова, Москва*

⁵*НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино*

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 3 мкм НА БИОТКАНЬ

Представляются результаты экспериментов по воздействию пачками наносекундных лазерных импульсов с длиной волны 3.03 мкм на образцы мягкой биологической ткани нескольких видов.

S.E. MINAEV^{1,2}, E.D. MINAEVA^{1,2}, N.S. NIKITIN^{3,4},
A.S. GULYASHKO⁵, I.A. LARIONOV⁵, V.A. TYRTYSHNYY⁵,
N.V. MINAEV², V.I. YUSUPOV²

¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

³*Center for Theoretical Problems of Physicochemical Pharmacology of the RAS, Moscow*

⁴*Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow*

⁵*IRE-Polus Corporation, Fryazino*

THE EFFECT OF 3-MICRONS PULSED LASER RADIATION ON SOFT BIOLOGICAL TISSUE

The paper presents the results of experiments on the effects of nanosecond laser pulses group with a wavelength of 3.03 μm on soft biological tissue samples of several types.

Использование лазерного излучения с длиной волны в области 3 мкм, которое хорошо поглощается в воде, представляется перспективным для различных медицинских приложений [1, 2]. Одним из наиболее распространённых является хирургический режим, при котором лазер используется в качестве скальпеля для выполнения разрезов, перфораций

или удаления фрагментов биоткани. Практически наиболее важным является воздействие в прецизионном «безкарбонизационном» режиме, когда лазерное излучение не приводит к образованию существенных областей карбонизации из-за высокого коэффициента поглощения излучения в биоткани.

В качестве образцов биоткани использовались фрагменты мышечной ткани свиньи и ткани свиной простаты. Воздействие на образцы производилось импульсами длительностью 1.5 нс с частотой 8 МГц и энергией импульса до 0.8 мкДж. Для перемещения излучения по поверхности образца использовался гальваносканер.

Поскольку поглощение лазерного излучения в биоткани в исследуемом диапазоне длин волн в основном определяется его поглощением в воде ($\mu_a \sim 10^4 \text{ см}^{-1}$), первоначально были выполнены тестовые эксперименты по лазерному воздействию на поверхность капли воды. Было показано, что такое воздействие приводит к нагреву тонкого приповерхностного слоя воды и инициирует активные гидродинамические процессы, сопровождающиеся генерацией широкополосного акустического сигнала.

При исследовании процессов облучения образцов биоткани с помощью тепловизора было показано, что температура на поверхности образцов в некоторых случаях превышает 100 °С. При этом обнаружено, что из-за наличия как временного, так и температурного ограничения при регистрации термограмм происходит занижение полученных значений.

Гистологический анализ показал, что используемый лазерный источник позволяет формировать на различных типах биоткани разрезы без очагов карбонизации. Этот эффект достигается за счёт того, что при воздействии наносекундными лазерными импульсами и при высокой объёмной плотности поглощённой энергии происходит периодический выброс наиболее нагретых микрочастиц биоткани. Такой выброс, как показали акустические исследования, вызван взрывным кипением воды в объёме биологической ткани.

Экспериментальные данные позволили уточнить механизм действия импульсного лазерного излучения с длиной волны 3.03 мкм при формировании разрезов на поверхности образцов мягких водонасыщенных биологических тканей.

Список литературы

1. Vogel A., Venugopalan V. Mechanisms of pulsed laser ablation of biological tissues // Chemical reviews. 2003. V. 103. No. 2. P. 577-644.
2. Жигарьков В.С. и др. Гидродинамические эффекты при лазерной резке фантомов биологических тканей // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 10. С. 942-948.

Ю.И. ЯНДЫБАЕВА¹, Ч ЛИ¹, Д.А. КАФЕЕВА¹, В.В. КЕСАЕВ^{1,2},
О.В. АНДРЕЕВА¹, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ПРЯМАЯ ЛАЗЕРНАЯ ЗАПИСЬ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СТРУКТУР В НАНОПОРИСТОЙ СИЛИКАТНОЙ МАТРИЦЕ

В данной работе продемонстрированы результаты прямой лазерной записи массива двулучепреломляющих структур в нанопористой силикатной матрице (НПСМ) со средним размером пор 17 нм и пористостью 50 %. Исследованы характеристики фазовой задержки и пропускания для одного слоя записанных элементов. Определены необходимые параметры для создания фазовой пластины на основе двулучепреломляющих элементов.

Yu.I. YANDYBAEVA¹, Ch. LI¹, D.A. KAFEEVA¹, V.V. KESAEV^{1,2},
O.V. ANDREEVA¹, R.A. ZAKOLDAEV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow

DIRECT LASER WRITING OF BIREFRINGENT STRUCTURES IN NANOPOROUS SILICATE MATRIX

We present the results of direct laser writing of birefringent structures array in a nanoporous silicate matrix (NPSM) with average pore size of 17 nm and porosity 50 %. The characteristics of retardance and transmission for one layer of recorded elements are investigated. The necessary parameters for fabrication of a phase plate based on birefringent elements are determined.

Прямая лазерная запись с использованием ультракоротких импульсов позволяет формировать различные функциональные структуры в объёме стёкол [1]. Широкое применение получили двулучепреломляющие структуры из периодических массивов нанорешёток. Такое наведённое двулучепреломление свидетельствует об изменении фазовой скорости проходящего света и появлении задержки на данных областях. Этот эффект позволяет создавать фазовые оптические элементы в толще силикатных материалов [2].

В настоящей работе исследуется запись двулучепреломляющих структур в нанопористой силикатной матрице (НПСМ) с показателем

преломления 1.22 [3]. Прямая лазерная запись производилась фемтосекундными лазерными импульсами (ANTAUS-20W-20u/1M Avesta, $\lambda = 515$ нм), сфокусированными (20X, NA = 0.4) в объём НПСМ на глубине 400 мкм. Значение фазовой задержки измерялось на двулучепреломляющем микроскопе Thorlabs LCC7201, спектры пропускания – на микроскопе-спектрофотометре МСФУ-К (ЛОМО).

При изменении режимов лазерного излучения ($P = 13 - 160$ мВт, $\nu = 50 - 200$ кГц, $\tau = 0.22 - 1$ пс) был получен массив микроструктур (рис. 1), которые обладают разной фазовой задержкой и поворотом поляризации. Величина наибольшей задержки за 1 слой составила 160 нм, ($\approx \lambda/4$ для $\lambda = 633$ нм). При этом пропускание НПСМ с данной структурой составляет 69 % (рис. 2). Это накладывает определённые ограничения на её применение в качестве оптического элемента.



Рис. 1. Фотография массива двулучепреломляющих структур в скрещённых поляризаторах

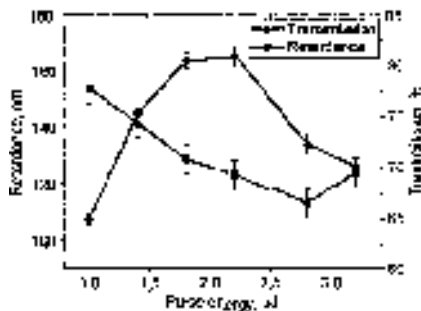


Рис. 2. График зависимости фазовой задержки и пропускания структуры от энергии в импульсе (для $\nu = 50$ кГц)

Лазерная запись производилась при поддержке гранта НИРМА ФТМФ Университета ИТМО. Исследование оптических свойств выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103).

Список литературы

1. Lei Y., et al. // *Optical Materials Express*. 2022. V. 12 (9). P. 3327-3355.
2. Fedotov S.S., et al. // *Applied Physics Letters*. 2016. V. 108 (7). P. 071905.
3. Вукон Е.Р., et al. // *Journal of Optical Technology*. 2022. V. 89 (3). P. 161-168.

А.Д. НЕЕЛОВА, Е.М. ШЕПИЛОВА¹, Е.И. НОСОВА¹,
С.Л. РОНГОНЕН², В.А. ПАРФЕНОВ

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова*

¹*Санкт-Петербургский институт истории РАН*

²*Санкт-Петербургский филиал архива РАН*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУМАГИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОЙ ОЧИСТКИ

Приведены результаты измерения кислотности и впитываемости бумаги после лазерной очистки иттербиевым волоконным импульсным лазером с длиной волны 1064 нм модельных образцов и исторических артефактов.

A.D. NEELOVA, E.M. SHEPILOVA¹, E.I. NOSOVA¹,
S.L. RONGONEN², V.A. PARFENOV

Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

¹*Saint-Petersburg Institute of History of the RAS*

²*Saint-Petersburg Branch of Archive of the RAS*

A STUDY OF CHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF PAPER UNDER ITS LASER CLEANING

Experimental results on pH value measurements and absorptivity measurements after laser treatment with the Ytterbium pulse fibre laser with the wavelength of 1064 nm performed on model samples and real historical artefacts are presented.

В последние годы лазерные технологии находят всё более широкое применение в сохранении культурного наследия. Одним из основных применений лазеров в этой области является очистка объектов культурно-исторического наследия от загрязнений природного и антропогенного происхождения. По сравнению с традиционными методами, используемыми в реставрации, технология лазерной очистки имеет ряд важных преимуществ, таких как высокая эффективность, щадящий характер воздействия на очищаемую поверхность, точность и скорость удаления загрязнений [1, 2].

Одной из самых важных характеристик бумаги в реставрационной практике является показатель кислотности бумаги (pH) [3]. Значение pH бумаги влияет на её сохранность, высокая кислотность ускоряет процесс старения. Бумага долго находящаяся в хранении обычно имеет показатель

кислотности 3.0 - 5.0 и обязательно должна подвергаться нейтрализации. Способность бумаги впитывать влагу также играет важную роль. Обезвоженная бумага становится ломкой и разрушается.

В ходе проведённых исследований были использованы модельные образцы офсетной бумага и три вида бумаги позднесоветской выработки, на поверхность которых были нанесены искусственные загрязнения в виде графитной пыли. Кроме того, исследовались подлинные артефакты – ряд книг, изданных в период с конца XVIII до начала XX веков, а также фрагмент газеты 1943 года. Измерения кислотности проводились контактным рН-метром образцы: исходном состоянии образцов и после очистки лазером. Результаты измерения рН бумаги приведены в табл. 1.

Из полученных результатов видна тенденция к нейтрализации бумаги, причём, как модельных образцов, так и исторических артефактов после очистки лазерным излучением. Значение рН повышается или не изменяется для кислой бумаги и понижается для щёлочной.

Во время измерения кислотности бумаги при получении водной вытяжки с поверхности фрагмента газеты наблюдалось, что области очищенные лазером имеют отличную от необработанной части газеты впитываемость. Поэтому были проведены исследования по измерению поверхностной впитываемости бумаги в соответствии с ГОСТ 12605-97 «Бумага и картон. Метод поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба)». Однако результаты данного эксперимента не позволяют сделать однозначный вывод о том, что лазерное излучение влияет на впитываемость бумаги, но можно утверждать, что это справедливо для определённых видов бумаги.

Таблица 1. Результаты измерения рН бумаги

Образцы	Без очистки	После очистки
Модельные образцы		
Образец 1	4,15	4,74
Образцы позднесоветской выработки		
№ 1	4,05	4,10
№ 2	4,75	4,32
№ 3	4,91	4,53
Артефакты		
№ 1	5,32	4,88

№ 1	4,14	4,74
№ 2	4,51	4,22
№ 4	4,37	4,46
№ 5	4,64	4,66
№ 6	4,23	4,40
№ 7	4,43	4,60
№ 8	4,23	4,40
№ 9	4,44	4,74

Список литературы

1. Cooper M. Laser cleaning of artworks. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
2. Parfenov V.A., et al. // Quantum Beam Science. 2022. V. 6 (3). P. 23.
3. Добрусина С.А. Лабораторные методики и технологические инструкции в консервации документов. СПб: РНБ, 2016.

А.С. ШИШКИНА, О.В. АНДРЕЕВА, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТОФЛЮИДНЫХ МИКРОКАНАЛОВ В ПОРИСТОМ СТЕКЛЕ УЛЬТРАКОРОТКИМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

В данной работе предложена новая методика формирования полых микроканалов в пористом стекле. Исследовано влияние щелочного травления (KOH) на различные типы структурной модификации стекла: локальное увеличение показателя преломления, формирование двулучепреломляющих структур и микропустот. Лазерная запись производилась остросфокусированными фемтосекундными лазерными импульсами ($\nu = 25$; 50 кГц, $\tau = 0,5$; 2 пс, $\nu = 1$; 5; 45 мм/с, $P = 15 - 60$ мВт). В результате щелочного травления были определены режимы создания оптофлюидных каналов в пористой матрице.

A.S. SHISHKINA, O.V. ANDREEVA, R.A. ZAKOLDAEV
ITMO University, Saint-Petersburg

OPTOFLUIDIC MICROCHANNEL FABRICATION IN POROUS GLASS BY ULTRASHORT LASER PULSES

In this work, we consider a new technique for the fabrication of hollow microchannels in porous glass. The effect of alkaline etching (KOH) on various types of structural modification of glass has been studied: a local increase in the refractive index, the formation of birefringent structures and microvoids. Laser writing was carried out with sharply focused femtosecond laser pulses ($\nu = 25$; 50 kHz, $\tau = 0.5$; 2 ps, $\nu = 1$; 5; 45 mm/s, $P = 15 - 60$ mW). As a result of alkaline etching, the regimes for creating unique optofluidic channels in a porous matrix were determined.

Прямая лазерная запись (ПЛЗ) широко применяется для трёхмерной модификации внутри оптических материалов с целью формирования канальных волноводов [1], двулучепреломляющих структур [2] и микроканалов [3]. Наш проект направлен на разработку новых субтрактивных технологий с целью формирования полых микроканалов в нанопористых материалах. Также были рассмотрены режимы формирования оптофлюидных элементов, где в центральной части расположен полый микроканал, а оболочка состоит из уплотнённого материала с повышенным показателем преломления.

Метод заключается в двух этапах: ПЛЗ ультракороткими импульсами для формирования трёх типов модификации пористого стекла и травление в растворе КОН для очищения структур от разрушенной фазы стекла.

ПЛЗ реализована на схеме, где в качестве излучателя использовался фемтосекундный волоконный иттербиевый лазер (Aptaus-20W-20u/1M Avesta). Фокусировка производилась с помощью объектива 20X, 0,4 NA. Микроструктуры записывались в объёме нанопористой силикатной матрицы с средним размером пор 7 нм и показателем преломления 1,34. Этап травления производился в 0,5М растворе гидроксида калия (КОН) при температуре 0 °С. После травления размер нанопор увеличивается до 17 нм, а показатель преломления снижается до 1,22.

Все типы модификации стекла исследовались с помощью оптической микроскопии в проходящем свете (рис. 1). После травления структуры уплотнённого материала очистились неоднородно в центральной части (рис. 1*d*), что неактуально для задач микрофлюидики. Микропустоты очистились от разрушенной части стекла в объёме (рис. 1*f*), однако структуры не удалось пропитать жидкостью. У двулучепреломляющих треков наблюдалась наиболее высокая селективность травления (рис. 1*e*). На микрофотографиях можно заметить, что центральная часть трека структур очистилась, а оболочка состоит из уплотнённого материала.

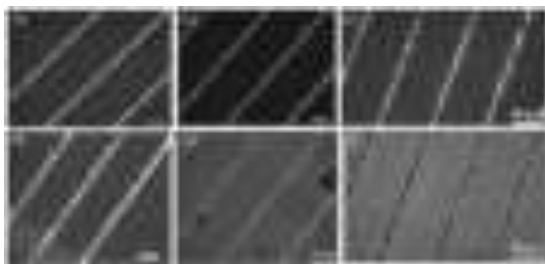


Рис. 1. Микрофотография в поляризованном свете: уплотнение материала (25 кГц, 500 фс, 45 мм/с, 54 - 58 мВт), двулучепреломляющие структуры (25 кГц, 500 фс, 5 мм/с, 15 - 50 мВт), микропустоты (50 кГц, 2 пс, 1 мм/с, 48-60 мВт) до (a, b, c) и после травления (d, e, f) соответственно

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103).

Список литературы

1. Macias-Montero // Scientific Reports. 2021. V. 11(1). P. 1-12.
2. Fedotov S.S. // Applied Physics Letters. 2016. V. 108 (7). P. 071905.
3. Liu Z. // Optics & Laser Technology. 2021. V. 141. P. 107118.

П.А. ТИТОВЕЦ, М.О. ФЕДЮК, А.А. СМОЛЬСКИЙ
Московский технический университет связи и информатики

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗНЫХ ДЛИН ВОЛН В ПРЕСНОЙ ВОДЕ И АТМОСФЕРЕ

Проведён эксперимент по исследованию поглощения оптического излучения различной длины волны в воздушной и водной средах, принимая в расчёт потери на стыках сред. Полученные по итогам эксперимента результаты были сравнены с математической моделью.

P.A. TITOVETS, M.O. FEDYUK, A.A. SMOLSKY
Moscow Technical University of Communications and Informatics

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ABSORPTION OF OPTICAL RADIATION OF DIFFERENT WAVELENGTHS IN FRESH WATER AND THE ATMOSPHERE

Experiment was carried out to study the absorption of optical radiation of different wavelengths in air and water, taking into account losses at the interfaces of the medias. The results obtained from the experiment were compared with the mathematical model.

При исследованиях с использованием лидарных систем под водой и систем беспроводной подводной лазерной связи [1, 2] помимо поглощения света самими средами [3, 4] необходимо знать потери лазерного излучения с различной длиной волны за счёт перехода света между средами (воздух-стекло, стекло-вода и т. п.), так как невозможно избежать подобных переходов.

Целью работы являлось экспериментальное исследование поглощения оптического излучения в воздухе и воде с учётом потерь мощности из-за переходов между средами. Для этого проведены измерения поглощения для лазеров следующих длин волн: 405, 450, 532 и 650 нм.

В данном эксперименте была задействована разработанная в МТУСИ уникальная научная установка [5, 6]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основным прибором для измерения мощности стал калориметр THORLABS PM100D с сенсорной головкой для измерения мощности на основе термоэлемента THORLABS S405C. Рабочий диапазон сенсорной головки составляет 0.19 - 20 мкВт и максимальная мощность до 5 Вт с апертурой диаметром 10 мм.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерения мощности излучения проводились на дистанциях 1 и 2.5 м в воздушной среде вместе со стёклами на пути луча и без, а также в водной среде со стёклами. Каждое измерение проводилось в течение 5 мин., с частотой записи результата 1 с, суммарно накапливая 300 отсчётов в каждом измерении и получая в результате усреднённое значение мощности излучения за это время. Увеличение времени измерения в два раза не оказало существенного изменения точности измерений. Сначала измерение производилось в воздухе без объектов между лазером и измерителем мощности. Затем между лазером и измерителем была помещена заполненная отстоявшейся водой установка, дистанция не менялась и так же составила 1 м. Далее вода была слита, стёкла протёрты насухо изнутри, чтобы избежать воды на их поверхности, и были проведены измерения на воздухе с учётом установленных на пути луча стёкол. Все описанные этапы были повторены ещё раз для дистанции 2.5 м.

Полученные результаты были сравнены с разработанной математической моделью и на основании этого были сделаны соответствующие выводы, а в модель [7] внесены корректировки. Данные результаты будут применены в последующих исследованиях и статьях по беспроводной оптической подводной связи и подводному лазерному зондированию.

Список литературы

1. Titovets P.A., Kazantsev S.Yu., et al. // Lasers. Measurements. Information. 2022. P. 4.
2. Pershin S.M., Grishin M.Ya., et al. // Proceedings of ICLO 2022. 2022. P. 181770.
3. Kaushal H., Kaddoum G. // IEEE ACCESS. 2016. P. 2552538.
4. Zeng Z., Fu H., et al. // IEEE Comm. Surv. and Tutor. 2019. V. 19(1). P. 204.
5. Kazantsev S.Yu., Miroshnikova N.E., et al. // Works of XXX international conference. 2022. P. 121.
6. https://mtuci.ru/science/unique_scientific_solutions/.
7. Miroshnikova N.E., Titovets P.A., et al. // SYNCHROINFO. 2020. P. 9166104.

Ю.К. СЕДОВА^{1,2}, С.А. МИНАЕВА², А.З. ВИНАРОВ³, Н.В. МИНАЕВ²

¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

²*Институт фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
Троицк*

³*Первый Московский государственный медицинский университет
им. И.М. Сеченова, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧЕЧНЫХ КАМНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты исследования состава образцов конкрементов мочевыделительной системы, полученных от живых пациентов, с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния.

Yu.K. SEDOVA^{1,2}, S.A. MINAEVA², A.Z. VINAROV³, N.V. MINAEV²

¹*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

²*Institute of Photon Technologies FSRC «Crystallography and Photonics» of the RAS,
Troitsk*

³*Sechenov First Moscow State Medical University*

STUDY OF THE COMPOSITION OF CONCRETION SAMPLES BY THE METHOD OF RAMAN SPECTROSCOPY

The results of the study of the composition of concretion samples from urinary system obtained from living patients using Raman spectroscopy are presented.

Уролитаз – мочекаменная болезнь – заболевание, проявляющееся формированием конкрементов во всех органах мочевыделительной системы. Камнеобразующие вещества делятся на органические и неорганические. Наиболее распространёнными неорганическими составляющими являются оксалаты кальция, органическими – ураты (соли мочевой кислоты) [1, 2]. Так как не все камни можно растворить, то для того, чтобы подобрать правильное лечение и вариант удаления (если камни большого размера) необходимо точно знать состав конкрементов.

Целью работы является экспериментальное исследование состава почечных камней для оценки возможности использования лазерного дробления *in vivo* для их удаления.

Для анализа состава камней в этой работе используется спектроскопия комбинационного рассеяния (КР). Небольшой фрагмент образца

помещался на предметное стекло, а затем в спектрометр. При помощи высокоскоростной камеры также были сделаны фотографии исследуемых образцов (рис. 1). Для каждого из образцов для статистики было собрано около двадцати спектров КР. В случае образца 4 имелся сильный побочный шум, поэтому информативные спектры получить не удалось. После были отобраны наиболее характерные спектры с наилучшим соотношением сигнал-шум. В них была скорректирована базовая линия и выделен спектральный диапазон, содержащий характерные линии (рис. 2). Полученные данные были проанализированы и проведено сравнение с ранее опубликованными материалами по тематике.



Рис. 1. Фотографии исследуемых почечных камней

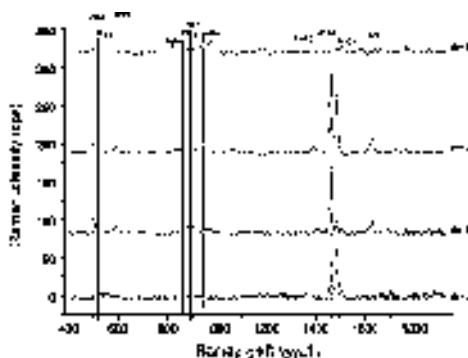


Рис. 2. Сравнение спектров КР почечных камней

Список литературы

1. Carmona P., Bellanato J., Escolar E. Infrared and Raman spectroscopy of urinary calculi: A review // *Biospectroscopy*. 1997. V. 3. No. 5. P. 331-346.
2. Castiglione V., et al. Raman chemical imaging, a new tool in kidney stone structure analysis: Case-study and comparison to Fourier Transform Infrared spectroscopy // *PLoS One*. 2018. V. 13. No. 8. P. e0201460.

А.А. СКРЫБЫКИНА^{1,2}, В.В. КОСТРОМЫКИНА^{1,2},
Г.С. РОГОЖНИКОВ²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),
Саров, Нижегородская обл.*

²*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

РАЗРАБОТКА ЖИДКИХ ОПТИЧЕСКИХ ФАНТОМОВ БИОТКАНИ ДЛЯ ЗАДАЧ ШИРОКОПОЛОСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Проведены исследования спектров поглощения и рассеяния жидких сред на базе колорированных липидных эмульсий в широком диапазоне 350 - 2400 нм как потенциальных фантомов мышечно-жировой и соединительной ткани для использования в задачах оптической биопсии.

А.А. SKRYBYKINA^{1,2}, V.V. KOSTROMYKINA^{1,2},
G.S. ROGOZHNIKOV²

¹*Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region*

²*All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

DEVELOPMENT OF LIQUID OPTICAL PHANTOMS SUBSTITUTING BIOLOGICAL TISSUES IN BROADBAND SPECTROSCOPY APPLICATIONS

Wide 350 - 2400 nm absorption and dispersion spectra of colored lipid emulsions have been studied in the role of potential muscle, adipose and connective tissue phantoms for optical biopsy applications.

В настоящее время неинвазивные и малоинвазивные оптические методы экспресс-диагностики серьёзных заболеваний являются одними из наиболее востребованных в развивающейся отрасли высокотехнологичной медицины [1]. К таковым можно отнести различные виды оптической биопсии [2] и оптической томографии. Как правило, оптическая биопсия нацелена на выявление характерных маркеров состояния основных видов биологических тканей человека – жировой, соединительной, мышечной, эпителиальной, а также биологических жидкостей – крови, лимфы и так далее, при помощи спектрального анализа. Технически, устройства для оптической биопсии являются сложными исследовательскими комплексами, состоящими из

оптических зондов, спектрометрических модулей, средств обработки и анализа данных [3], и для процесса настройки, калибровки и обучения навыкам работы требуются модельные среды, повторяющие по некоторым своим характеристикам биологические ткани – здоровые и с патологией.

Приведены результаты экспериментальных исследований поглощения и рассеяния широкополосного оптического излучения в диапазоне 350 - 2400 нм образцами колорированных липидных эмульсий [4], которые могут найти применение в качестве фантомов мышечно-жировой ткани, а также соединительной ткани с заданными спектральными особенностями, моделирующими поражения, характерные для развивающегося онкологического процесса.

Список литературы

1. Artemyev D.N., et al. // *Molecules*. 2021. V. 26 (7).
2. Spliethoff J.W., et al. // *Clinical Cancer Research*. 2016. V. 22 (2).
3. Belkov S.A., et al. // *Appl. Phys. B*. 2011. V. 105. P. 641-648.
4. Скрыбыкина А.А. и др. // Сб. трудов XII Школы НЦФМ. Саров, 2022

Ш.Т. БЕРДЫБАЕВА, Е.Н. ТЕЛЬМИНОВ, Т.А. СОЛОДОВА
Национальный исследовательский Томский государственный университет

ВОЛНОВОДНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ СЕНСОР НА КРАСИТЕЛЕ «НИЛЬСКИЙ КРАСНЫЙ»

Исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики тонкоплёночной волноводной структуры на лазерном красителе «Нильский красный», имеющей сенсорные свойства к CO₂.

Sh.T. BERDYBAEVA, E.N. TEL'MINOV, T.A. SOLODOVA
National Research Tomsk State University

WAVEGUIDE LASER SENSOR ON THE NILE RED DYE

Spectral-luminescent and generation characteristics of a thin-film waveguide structure based on the Nile Red laser dye having sensory properties to CO₂ are investigated.

Среди большого разнообразия люминесцентных химических датчиков в последнее время всё большее внимание уделяется применению оптических тонкоплёночных сенсоров с использованием в них органических лазерно-активных сред. Устройства, работающие в режиме лазерной генерации, имеют высокую чувствительность [1, 2]. Основными достоинствами данных приборов являются простота создания и низкая себестоимость, широкие возможности выбора сенсорных материалов на различные аналиты и условия использования. Цель работы – создание эффективных твердотельных фотовозбуждаемых флуоресцентных сенсорных структур на основе лазерного красителя «Нильский красный» (НК), работающих в режиме лазерной генерации и изменяющих излучательные характеристики в присутствии аналита (CO₂).

Для создания сенсорной тонкоплёночной структуры выбранный лазерный краситель растворяли в толуоле с полиметилметакрилатом (ПММА). Генерационные и сенсорные характеристики полученной плёнки исследовались на установке, представленной на рис. 1. Плёнка сенсора помещалась в герметичную кювету, которая наполнялась смесью инертного газа (аргон) и CO₂ с различными концентрациями (0,1 - 10 %) Накачка осуществлялась излучением второй гармоники (532 нм) YAG-Nd³⁺ лазера. Спектры излучения регистрировались на спектрометре

AvaSpec-2048. Регистрация проводилась в течение 30 с после добавления газовой смеси.

В результате взаимодействия аналита (CO_2) с сенсорной поверхностью исследуемой тонкоплёночной волноводной структуры наблюдалось увеличение интенсивности излучения в 2,5 раза с одновременным сужением спектра люминесценции в 2 раза до $\Delta\lambda_{1/2} = 16$ нм (рис. 2).

Такое поведение активного волновода говорит о появлении в нём генерации и формирования модовой структуры излучения.

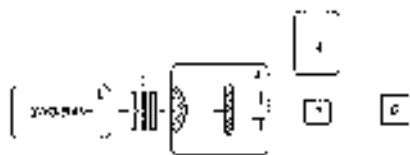


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – YAG:Nd³⁺; 2 – нейтральные светофильтры; 3 – система формирования пучка накачки; 4 – газосмесительная система, 5 – газовая кювета; 6 – спектрометр

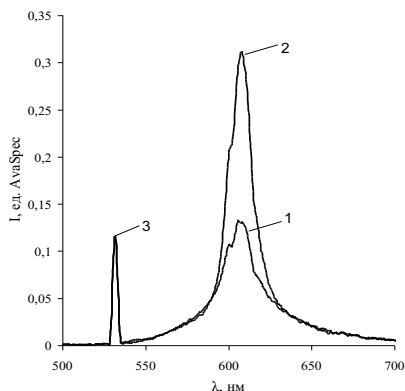


Рис. 2. Спектр генерации плёнки ПММА с НК в толуоле: 1 – до добавления 0,5 % CO_2 , 2 – при добавлении 0,5 % CO_2 , 3 – излучение накачки

В результате проведённых исследований создан тонкоплёночный фотовозбуждаемый лазер на красителе «Нильский красный». Исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики. Показано, что созданная тонкоплёночная волноводная структура имеет сенсорные свойства к аналиту CO_2 .

Список литературы

1. Wang Y., Yang Y., Turnbull G.A., et al. // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2012. V. 554. P. 103-110.
2. Berdybaeva Sh.T., Tel'minov E.N., Solodova T.A., Nikonova E.N., Samsonova L.G., Kopylova T.N. // Quantum Electronics. 2021. V. 51. P. 206-210.

В.А. ЯКИМУК, Я. АЛСАИФ, О.В. АНДРЕЕВА, Р.А. ЗАКОЛДАЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА В НАНОПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Приведены результаты экспериментов по исследованию сенсорных свойств оптических волноводов. Показаны возможности применения волноводов в нанопористой силикатной матрице для изучения изменений окружающей среды.

V.A. YAKIMUK, Y. AL-SAIF, O.V. ANDREEVA, R.A. ZAKOLDAEV
ITMO University, Saint-Petersburg

SENSORIC PROPERTIES OF OPTICAL WAVEGUIDES IN NANOPOROUS ENVIRONMENT

Presents the result of experiments on the research of sensor characteristics of optical waveguides. Observed application opportunities of waveguides in nanoporous silicate matrix for investigation of environment changes.

Оптический волновод – это пространственно-неоднородная структура, предназначенная для направленного пропускания света. Формирование оптических волноводов в оптически прозрачных диэлектриках происходит в основном с помощью прямой лазерной записи [1]. Однако волноводы, записанные в сплошных силикатных материалах сильно ограничены в сенсорных свойствах, которые он проявляет за счёт наличия волны затухания. Поэтому мы предлагаем записывать оптические волноводы внутри нанопористой силикатной матрицы (НПСМ). Это даст возможность обнаруживать мелкие примеси диагностируемого вещества, которые поглощает нанопористая матрица [2].

Поскольку наша цель работы состоит в том, чтобы показать сенсорные свойства объёмных волноводов, первый эксперимент был направлен на проверку реакции волноводов на дыхание. В результате дыхания на поверхности образуются тысячи микрокапель, скорость испарения которых зависит от концентрации определённых молекул в них [3]. Из рис. 1 видно, что после начала дыхания на НПСМ с волноводами мода лазера начинает менять своё положение. Можно сделать вывод, что реализация волноводного датчика дыхания возможна, так как микрокапли от дыхания проникают в НПСМ и в будущем можно измерить скорость их испарения из образца.

Во втором эксперименте НПСМ пропитывали 1,5 мкл воды. По рис. 2 видно, что распределение интенсивности изменяется мгновенно после попадания жидкости на образец и через 5 с ближнепольное распределение интенсивности полностью исчезает. Вода останавливает возможность прохождения света через волновод, заполнив его. По данным результатам видна скорость захвата нанопорами жидкости, что важно для сенсорного анализа.

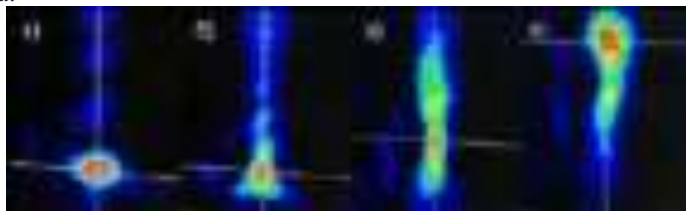


Рис. 1. Изменение ближнепольного распределения интенсивности в результате дыхания



Рис. 2. Изменение ближнепольного распределения интенсивности в результате попадания на образец капли воды

Создание волноводов выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10103). В.А. Якимук выражает признательность за поддержку исследований сенсорных свойств канальных волноводов в рамках финансовой поддержки гранта НИРМА ФТ МФ Университета ИТМО.

Список литературы

1. Федотов С.С., Бутвина Л.Н., Охримчук А.Г. // 9й Межд. семинар по волоконным лазерам. 2020. С. 32-33.
2. Zakoldaev R.A., Lijing Z., Yakimuk V.A., Yandybaeva Y.I., Shishkina A.S., Andreeva O.V. // Journal of Laser Micro Nanoengineering. 2021. V. 16. No. 3. P. 155-159.
3. Lapointe J., et al. Smartphone screen integrated optical breathalyzer // Sensors. 2021. V. 21. No. 12. P. 4076.

М.О. АВРАМЧИКОВ¹, Д.А. ГУРЬЕВ, Н.Э. НИКОЛАЕВ,
А.В. ПУСТОВАЛОВ, А.Р. РАВИН, В.Б. ЦВЕТКОВ¹, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва
¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ДИФФУЗИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ В СИЛИКАТНОМ И ФОСФАТНОМ НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ

Приведены результаты экспериментального исследования технологий ионного обмена и твердотельной диффузии оксида свинца для получения оптических волноводов в лазерных стёклах ГЛС-6 и ГЛС-24. На основании экспериментально измеренных зависимостей коэффициента замедления от времени диффузии, выбрана математическая модель и проведён расчёт распределения показателя преломления в волноводном слое.

M.O. AVRAMCHIKOV¹, D.A. GURIEV, N.E. NIKOLAEV,
A.V. PUSTOVALOV, A.R. RAVIN, V.B. TSVETKOV¹,
T.K. CHEKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow
¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

DIFFUSED OPTICAL WAVEGUIDES IN SILICATE AND PHOSPHATE NEODYMIUM GLASS

The results of an experimental study of the technologies of ion exchange and solid-state diffusion of lead oxide for the production of optical waveguides in the GLS-6 and GLS-24 laser glasses are presented. Based on the experimentally measured dependences of the effective index on the diffusion time, a mathematical model was chosen and the distribution of the refractive index in the waveguide layer was calculated.

Твердотельные волноводные лазеры на основе активных стёкол и кристаллов находят применение в таких областях науки и техники, как оптические системы связи, спектроскопия, радиофотоника и др. Они позволяют осуществлять генерацию как в непрерывном режиме, так и в режиме ультракоротких импульсов. На их основе создаются оптические частотные гребёнки, компактные, высокостабильные генераторы СВЧ-диапазона, устройства частотной и временной оптической рефлектометрии и др. [1].

Наиболее распространённой технологией изготовления волноводов в активных стёклах является ионообменная диффузия, обеспечивающая низкий уровень потерь $\sim 0,1$ дБ/см [2]. При этом для создания волноводного слоя стекло выдерживается в расплаве солей KNO_3 , NaNO_3 , AgNO_3 при температурах 220 - 450 °С. Зарубежные производители выпускают специализированные типы активных стёкол для создания ионообменных волноводных структур: Schott IOG-1, IOG-10 и др. По данной технологии получены оптические волноводы с низкими потерями в силикатных неодимовых стёклах отечественного производства ГЛС-2, ГЛС-3, КГСС026 [3].

Однако не все типы стекла обладают необходимым химическим составом и стойкостью для осуществления ионного обмена. В работе [4] исследовалась возможность формирования ионообменных волноводов в стекле ГЛС-10 при различных составах и температурах расплава. При этом изготовленные волноводы имели высокие потери. Волноводы хорошего качества были получены с помощью твердотельной диффузии оксида свинца PbO в стекло, однако в работе не приведены значения их оптических потерь.

В настоящей работе нами исследованы возможности применения технологий ионного обмена и твердотельной диффузии PbO для получения оптических волноводов в силикатном стекле ГЛС-6 и фосфатном стекле ГЛС-24.

Список литературы

1. Choudhary A., Kannanet P., Lagatsky A.A., Beecher S.J. Ultrafast high-repetition-rate waveguide lasers // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2015.
2. Broquin J.-E., Honkanen S. Integrated photonics on glass: A review of the ion-exchange technology achievements // Appl. Sci. 2021. No. 11. P. 4472.
3. Бабукова М.В., Никонов Н.В., Петровский Г.Т. и др. Исследование диффузионных волноводов на неодимовых силикатных стеклах // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 9. С. 1973-1975.
4. Никитин В.А., Святенко Н.В., Яковенко Н.А. Получение интегрально-оптических волноводов в лазерном стекле методами ионного обмена и твердотельной диффузии // Аватметрия. 2003. № 2.

Н.С. СЕМИН^{1,2}, И.О. КИНЯЕВСКИЙ¹, В.И. КОВАЛЕВ¹,
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ¹, А.В. КОРИБУТ¹, Е.Э. ДУНАЕВА³, А.А. ИОНИН¹

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ВЫНУЖДЕННОЕ КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ ЧИРПИРОВАННЫХ ИМПУЛЬСОВ ТИТАН-САПФИРОВОГО ЛАЗЕРА В ШЕЕЛИТОПОДОБНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Экспериментально в одинаковых условиях накачки сопоставлены эффективности ВКР-преобразования чирпированных импульсов титан-сапфирового лазера в ВКР-активных кристаллах $BaWO_4$, $Ca_3(VO_4)_2$ и $SrMoO_4$. Наибольшая эффективность преобразования $\sim 11\%$ получена в кристалле $SrMoO_4$.

N.S. SEMIN^{1,2}, I.O. KINYAEVSKIY¹, V.I. KOVALEV¹,
L.V. SELEZNEV¹, A.V. KORIBUT¹, E.E. DUNAIEVA³, A.A. IONIN¹

¹Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

²National Research Nuclear University (Moscow Engineering Physics Institute)

³Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

STIMULATED RAMAN SCATTERING OF CHIRPED TITANIUM-SAPPHIRE LASER PULSES IN SCHEELITE-LIKE CRYSTALS

The experimental results of the SRS conversion efficiency determination of chirped titanium-sapphire laser pulses in $BaWO_4$, $Ca_3(VO_4)_2$ and $SrMoO_4$ crystals under the same pump conditions are presented. The highest conversion efficiency, $\sim 11\%$, is obtained in $SrMoO_4$.

Реализация эффективного вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) ультракоротких (фемтосекундных) лазерных импульсов в кристаллах является нетривиальной задачей. Это связано с тем, что, вследствие относительно большого (как правило, порядка пикосекунд) времени затухания ВКР-активных колебаний ВКР-взаимодействие происходит в существенно нестационарном режиме. Как следствие, для достижения высокой эффективности ВКР-преобразования в таком случае требуется повышать интенсивность излучения накачки, а это, в свою очередь, ведёт к активации других нелинейных эффектов, зачастую подавляющих ВКР [1]. В такой ситуации особую актуальность

приобретает поиск материалов и параметров/режимов их накачки, которые позволили бы преодолеть отмеченные трудности. Один из путей решения этих проблем является использование chirпированных, растянутых во времени, лазерных импульсов для накачки ВКР-активных кристаллов [2].

В данной работе в одинаковых условиях накачки экспериментально исследовано ВКР преобразование chirпированных импульсов титан-сапфирового лазера в шеелитоподобных кристаллах BaWO_4 , $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ и SrMoO_4 . Лазер излучал на длине волны $\lambda = 0,75$ мкм спектрально ограниченные импульсы длительностью 90 фс (исходная длительность). Импульс chirпировался, растягивался до длительности ~ 200 пс, и усиливался до энергии ~ 12 мДж. Полученное излучение направлялось через линзу с фокусным расстоянием $f = 100$ см в образцы кристаллов BaWO_4 , $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ и SrMoO_4 . Эффективность ВКР-преобразования определялась как отношение энергии стоксового импульса к полной энергии импульса накачки. Стоксов импульс отделялся от накачки с помощью дифракционной решётки 1200 штр/мм.

Стоксова ВКР-компонента в образцах BaWO_4 и SrMoO_4 появлялась при энергии импульса накачки порядка 3 мДж. С ростом энергии накачки эффективность ВКР-преобразования в этих кристаллах возрастала, достигая при энергии лазерного импульса ~ 10 мДж 3 и 11 %, соответственно. В образце $\text{Ca}_3(\text{VO}_4)_2$ зарегистрировать стоксов пик не удалось даже при максимальной энергии лазерной системы (12 мДж). Таким образом, среди рассмотренных, наиболее эффективным для ВКР преобразования chirпированных импульсов титан сапфирового лазера в однопроходной схеме взаимодействия оказался кристалл SrMoO_4 .

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-79-10068.

Список литературы

1. Grabtchikov A.S., Chulkov R.V., Orlovich V.A., et al. // Opt. Lett. 2003. V. 28. No. 11. P. 926-928.
2. Киняевский И.О., Ковалев В.И., Корибут А.В. и др. // Квантовая электроника. 2020. Т. 52. № 3. С. 278-282.

К.А. СУББОТИН^{1,2}, А.И. ТИТОВ^{1,2}, Д.А. ЛИС², Ю.И. ЗИМИНА^{1,2},
Я.С. ДИДЕНКО^{1,2}, Г.З. ЭЛАБЕДИН, К. ЕРЕМЕЕВ⁴, Р. М. СОЛЕ³,
М. АГУИЛО³, П.А. ВОЛКОВ⁵, П.А. ПОПОВ⁶, Е.В. ЧЕРНОВА¹,
Ф. ДИАЗ³, П. КАМИ⁴, Х. МАТЕОС³, П.А. ЛОЙКО⁴

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

²*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва*

³*Университет Ровира-и-Виргили, Таррагона, Испания*

⁴*Центр по изучению ионов, материалов и фотоники, Кан, Франция*

⁵*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

⁶*Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского*

РОСТ, СТРУКТУРА, ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТА И СПЕКТРОСКОПИЯ МОНОКРИСТАЛЛА MgMoO₄, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ Tm³⁺

Методом Чохральского был выращен монокристалл Tm³⁺:MgMoO₄. Измерена фактическая концентрация Tm³⁺ в кристалле. Структура кристалла уточнена с помощью рентгенофазового анализа. Определены коэффициенты теплового расширения кристалла. Измерена теплопроводность кристалла вдоль оси с. Выполнен комплекс исследований кристалла методами оптической и рамановской спектроскопии, показавшей его перспективность для применений в фотонике.

К.А. SUBBOTIN^{1,2}, А.И. TITOV^{1,2}, D.A. LIS², Yu.I. ZIMINA^{1,2},
Ya.S. DIDENKO^{1,2}, G.Z. ELABEDINE³, K. EREMEEV⁴, R.M. SOLÉ³,
M. AGUILÓ³, P.A. VOLKOV⁵, P.A. POPOV⁶, E.V. CHERNOVA¹,
F. DÍAZ³, P. CAMY⁴, X. MATEOS³, P.A. LOIKO⁴

¹*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

²*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow*

³*University Rovira i Virgili, Tarragona, Spain*

⁴*Centre for Researches of Ions, Materials and Photonics, Caen, France*

⁵*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow*

⁶*Petrovsky Bryansk State University*

GROWTH, STRUCTURE, THERMAL PROPERTIES AND SPECTROSCOPY OF Tm³⁺-DOPED MgMoO₄

Tm³⁺:MgMoO₄ single-crystal was grown by the Czochralski method. The actual Tm³⁺ doping level was measured. Structure of the crystal was determined using x-ray analysis. The thermal expansion coefficients of this crystal were determined. A complex of studies of the crystal by the methods of optical and Raman spectroscopy was carried out, which showed promising applications of this crystal in photonics.

В последние годы кристаллы семейства MWO_4 (где $M = Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}$ и так далее), легированные редкоземельными ионами, привлекают большое внимание как перспективные лазерные среды [1]. В частности, в кристаллах $MgWO_4$, легированных ионами тулия (Tm^{3+}), получена эффективная лазерная генерация [2]. Однако выращивание кристалла $MgWO_4$ представляет значительные трудности. В отличие от $MgWO_4$, кристалл $MgMoO_4$ может быть легко выращен методом Чохральского [3]. Данная работа посвящена выращиванию кристалла $Tm:MgMoO_4$ методом Чохральского, а также исследованию структурных, термических и спектроскопических свойств данного кристалла.

Кристалл выращивался из расплава номинального состава $Mg_{0.95}Tm_{0.05}MoO_4$. Методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой была измерена фактическая концентрация Tm^{3+} в кристалле, составившая 0,1 ат. %, таким образом коэффициент сегрегации данной примеси в кристалле можно оценить в 0,02. Рентгенофазовый анализ показал, что кристалл имеет моноклинную структуру (пространственная группа $C2/m$), параметры решётки $a = 10.2769(2) \text{ \AA}$, $b = 9.2898(5) \text{ \AA}$, $c = 7.0269(4) \text{ \AA}$ и $\beta = 106.898(6)$.

Тензор линейного теплового расширения $Tm:MgMoO_4$ в ортогональной физической системе координат имеет вид:

$$(a'_{ij}) = \begin{pmatrix} 7.103 & 0 & 0 \\ 0 & 14.30 & 0 \\ 0 & 0 & 3.691 \end{pmatrix} \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$$

Теплопроводность кристалла $MgMoO_4$ измерялась вдоль оси c . В интервале температур от 50 до 300 К она монотонно уменьшается от 19,51 до 2,64 $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}$. Поляризованные рамановские спектры b -среза кристалла $Tm:MgMoO_4$ (рис. 1) содержат интенсивные пики в двух разных диапазонах: 122 - 424 см^{-1} и 754 - 969 см^{-1} . Кристалл $Tm^{3+}:MgMoO_4$ имеет широкую, сильно поляризованную полосу излучения в диапазоне от 1,6 до 2,15 $\mu\text{м}$ (рис. 2).



Рис. 1. Поляризованные спектры КР кристалла 0,1 ат. % $Tm^{3+}:MgMoO_4$

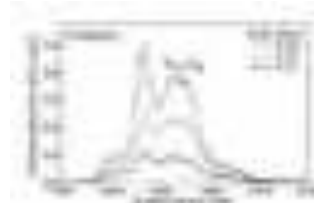


Рис. 2. Спектры поляризованной люминесценции ионов Tm^{3+} в $MgMoO_4$

Список литературы

1. Zhang L., Chen W., et al. // Opt. Mater. Express. 2016. V. 6 (5). P. 1627-1634.
2. Loiko P., Zhang L., et al. // J. Alloy Compd. 2018. V. 763. P. 581-591.
3. Cavalli E., Belletti A., et al. // J. Phys. Chem. Solids. 2008. V. 69 (1). P. 29-34.

А.А. АНИКЬЕВ, М.Ф. УМАРОВ¹

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Вологодский государственный университет

КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ПРИМЕСЯМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Получены спектры рассеяния света на колебаниях A_1 и E -симметрии в образцах с различной концентрацией примесей. По спектральному распределению комбинационного рассеяния света при комнатной температуре рассчитана обобщённая восприимчивость в низкочастотной области. Показано, что обобщённая восприимчивость на низких частотах в образцах ниобата лития различной добротности может быть аппроксимирована в модели ангармонического осциллятора, связанного через затухание с релаксацией акустических колебаний на дислокациях. Вклад примесной составляющей в затухание не был определяющим, в отличие от вклада дефектов стехиометрии

A.A. ANIKIEV, M.F. UMAROV¹

Bauman Moscow State Technical University
¹Vologda State University

RAMAN SCATTERING OF LIGHT IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS WITH TRANSITION METAL IMPURITIES

Spectra of light scattering on vibrations of A_1 and E -symmetries were obtained in samples with different impurity concentrations. The generalized susceptibility in the low-frequency region is calculated from the spectral distribution of the Raman light scattering at room temperature. It is shown that the generalized susceptibility at low frequencies in lithium niobate samples of various Q -values can be approximated in the model of an anharmonic oscillator associated through attenuation with relaxation of acoustic vibrations on dislocations. The contribution of the impurity component to the damping was not decisive, in contrast to the contribution of stoichiometry defects.

Несмотря на то, что в последние годы были получены и исследованы соединения, превосходящие ниобат лития по отдельным свойствам, он остается модельным кристаллом для изучения влияния на его свойства примесей, дефектов, условий выращивания.

Целью настоящей работы является изучение особенности комбинационного рассеяния света в образцах ниобата лития, полученных в условиях выращивания, способствующих образованию нелокальных

дефектов стехиометрии – дислокаций, границ зёрен, а также образцов с различной концентрацией примесей. Особый интерес в этой связи вызывает поведение крыла линии квазиупругого рассеяния.

Участвующие в эксперименте образцы ниобата лития были выращены методом Чохральского. Условия выращивания, состав шихты и ориентация образцов ниобата лития для проведения экспериментов по рассеянию света подробно изложены в работах [1, 2]. Для всех образцов была определена акустическая добротность из измерений коэффициента поглощения звука.

Измерение интенсивности рассеяния света на образцах ниобата лития с различной акустической добротностью показало, что с ростом акустического поглощения, интенсивность полосы 120 см^{-1} растёт по логарифмическому закону. Спектры рамановского рассеяния на образцах с различной концентрацией примесей гадолиния, магния и цинка показали значительное уширение линий A_1 -симметрии 274 см^{-1} и линии 660 см^{-1} с ростом концентрации. В низкочастотной области, $5 - 150\text{ см}^{-1}$ возрастание интенсивности рассеяния на акустической плотности состояний связано с ростом концентрации дефектов и, соответственно, расширением области зоны Бриллюэна, дающей вклад в рассеяние света первого порядка. Данное наблюдение подтверждает наше предположение о проявлении плотности акустических состояний в спектрах КРС за счёт нарушения правил отбора по волновому вектору. Рассчитана обобщённая восприимчивость в низкочастотной области в модели взаимодействия оптической ветви с акустической плотностью состояний, причём была учтена примесная составляющая затухания оптического фонона методом когерентного потенциала для функции Грина кристалла с примесями замещения.

Кроме того, аппроксимация спектров рассеяния света в области низких частот проведена в модели ангармонического осциллятора, связанного с релаксатором, при этом связь осциллятора с релаксатором была пропорциональна концентрации дефектов стехиометрии. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с использованной моделью. Учёт вклада примесей в затухание оптических мод и, соответственно, в спектральное распределение обобщённой восприимчивости не был определяющим, в сравнении с превосходящим вкладом топологических дефектов.

Список литературы

1. Amikiev A.A., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., et. al. // Opt. Mater. 2021. V. 111. P. 110729.
2. Аникьев А.А., Умаров М.Ф. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 1. С. 19.

О.В. ТОККО¹, А.В. КАДЕТОВА^{1,2}, А.И. ПРУССКИЙ¹,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ²

¹*Петрозаводский государственный университет*

²*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

РЕТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ $\text{LiNbO}_3:\text{Mg, Zn}$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРЯМОГО И ГОМОГЕННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Методом полнопрофильного анализа рентгенограмм показано, что в зависимости от технологии получения кристаллов меняется их структурное состояние. Кристалл, полученный методом гомогенного легирования, с концентрацией цинка 4.68 мол. % имеет наименьшее количество дефектов, в том числе в пустом октаэдре, что говорит о более высокой степени структурной однородности данного кристалла по сравнению с остальными.

O.V. TOKKO¹, A.V. KADETOVA^{1,2}, A.I. PRUSSKI¹,
M.N. PALATNIKOV²

¹*Petrozavodsk State University*

²*I.V. Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral
Raw Material of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

X-RAY STUDIES OF $\text{LiNbO}_3:\text{Mg, Zn}$ CRYSTALS OBTAINED USING DIRECT AND HOMOGENEOUS DOPING METHODS

The method of full-profile analysis of X-ray diffraction patterns shows that, depending on the technology of obtaining crystals, their structural state changes. The crystal obtained using homogeneous doping with a zinc concentration of 4.68 mol. % has the least number of defects, including in the empty octahedron, which indicates a higher degree of structural homogeneity of this crystal compared to the others.

В кристаллах LiNbO_3 , легированных Mg и Zn, повышается стойкость к лазерному излучению, в связи с чем ведутся активные исследования возможности их применения в нелинейной оптике. В данной работе исследовались образцы ниобата лития двойного легирования катионами (Mg:Zn), полученные по двум технологиям (табл. 1).

Образцы для исследований предоставлены ИХТРЭМС КНЦ РАН. Дифракционные картины были зарегистрированы на дифрактометре ДРОН-6 ($\lambda\text{CuK}\alpha = 1.54178 \text{ \AA}$). Уточнение профильных характеристик

рентгенограмм и структурных характеристик (координат атомов основного мотива структуры, примесных атомов в решётке, и антиструктурных: атомы ниобия в позиции лития или в пустом кислородном октаэдре и их концентрации в зависимости от способа легирования) исследуемых образцов проводилось методом Ритвельда с использованием программного комплекса MR1A [3].

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов

№ обр.	1	2	3	4
легирование	прямое [1]	гомогенное [2]	прямое [1]	гомогенное [2]
C _v (Zn), мол. %	3.74	3.83	4.35	4.68
C _v (Mg), мол. %	1.09	0.97	1.02	0.90

Было установлено, что при двойном легировании объём элементарной ячейки исследуемых кристаллов увеличивается по сравнению с данными для кристалла стехиометрического состава. В образцах 1 и 2 атомы Mg и Zn занимают литиевый октаэдр в структуре, при этом не локализуясь в позиции Li, а смещены либо по направлению к центру октаэдра, либо к кислородной плоскости. В образцах 3 и 4 атомы Zn также занимают позиции Li, а атомы Mg занимают разные позиции в решётке в зависимости от концентрации Zn. В образце 3 атомы Mg занимают позиции Li, а в образце 4 атомы Mg занимают пустой октаэдр в структуре.

В образцах, полученных по разным технологиям легирования с близкими концентрациями Mg и Zn (образцы 1 и 3), атомы Nb занимают часть позиций Li, а также размещаются в пустых октаэдрах. В образце прямого легирования не наблюдается атомов Nb в позиции Li, а в образце гомогенного легирования исчезает дефект: Nb в пустом октаэдре.

Анализ межатомных расстояний в литиевых и ниобиевых октаэдрах, а также в области дефектов показал, что в образце прямого легирования литиевый октаэдр стремится к правильной форме, а степень искажения ниобиевого октаэдра, наоборот, увеличивается. В случае гомогенного легирования расстояния в литиевых и ниобиевых октаэдрах близки к таковым в стехиометрическом кристалле.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-22-20114, проводимого совместно с Республикой Карелия с финансированием из Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия.

Список литературы

1. Palatnikov M.N, Sidorov N.V. //Ch. II. USA: NOVA Science Publishers, 2014. P. 31-168.
2. Маслобеова С.М. и др. // Журнал неорганической химии. 2020. Т. 65. № 6. С. 856-864.
3. Zlokazov V.B. // J. Appl. Crystall. 1992. V. 25. P. 447-451.

А.В. СОСУНОВ, И.В. ПЕТУХОВ, Р.С. ПОНОМАРЕВ,
М. КУНЕВА¹

*Пермский государственный национальный исследовательский университет
¹Институт физики твердого тела Академии наук Болгарии, София, Болгария*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Приведены результаты исследований однородности структуры монокристаллов ниобата лития промышленного (серийного) производства различных кристаллофизических срезов конгруэнтного состава с двухсторонней полировкой методом рентгеновской компьютерной томографии. Обнаружены многочисленные неоднородные полосы, располагающиеся перпендикулярно базовому срезу.

A.V. SOSUNOV, I.V. PETUKHOV, R.S. PONOMAREV, M. KUNEVA¹

Perm State University

¹Institute of Solid State Physics Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE OF LITHIUM NIOBATE SINGLE CRYSTALS BY X-RAY COMPUTER TOMOGRAPHY

This work is devoted to research structure homogeneity of lithium niobate single crystals of industrial (serial) production of various crystallophysical axis of congruent composition with double-sided polishing by X-ray computed tomography are presented. Numerous inhomogeneous bands were found, located perpendicular to the base cut.

Монокристаллические пластины ниобата лития (НЛ) широко используются в интегральной, акустической и лазерной технике. Потенциал применения НЛ постепенно расширяется, что приводит к необходимости изучения характеристик изделий в зависимости от однородности структуры и состава НЛ, например, оптических волноводов [1] или роста доменных структур [2].

Целью работы является экспериментальное исследование однородности структуры вейферов (пластин) ниобата лития конгруэнтного состава с двусторонней полировкой методом рентгеновской компьютерной томографии. Исследование состава пластин НЛ проводили с помощью микрофокусной системы рентгеновского контроля с функцией

компьютерной томографии на базе рентгеновской установки фирмы Nikon Metrology XTH 225ST. Напряжение на трубке составляло 170 кВ, сила тока 100 мА, давление в камере 2 бара, время съёмки – пять часов. В качестве детектора выступала плоская панель типа XRD 1620 с частотой 3.5 Гц. В качестве исследуемых пластин НЛ, использовались вейферы диаметром 76 мм производства Фомос-Материалы (Россия) и CQT (Китай) различных кристаллофизических срезов (рис. 1).

Для номинально чистых монокристаллических пластин НЛ обнаружена неоднородность состава по всей площади поверхности и глубине пластин, независимо от производителя и кристаллофизического среза (рис. 2). Дефектные полосы имеют преимущественное направление перпендикулярное базовому срезу. Обнаруженные неоднородности структуры могут вносить вклад в оптические потери, влиять на рост доменных структур. Таким образом, необходимо минимизировать влияние неоднородностей состава НЛ на характеристики конкретных устройств

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Пермского края, договор № С-26/848.

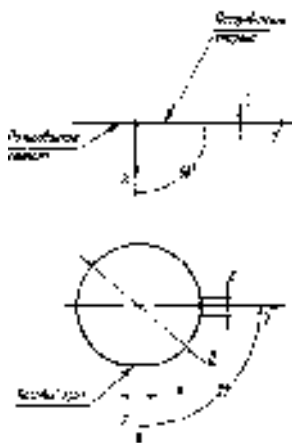


Рис. 1. Схема кристаллофизической ориентации пластины НЛ X-среза



Рис. 2. Структура НЛ X-среза производства CQT

Список литературы

1. Sosunov A.V., Ponomarev R.S., et al. // Photonics. 2021. V. 8 (12). P. 571.
2. Dolbilov M.A., Shishkin E.I., et al. // Ferroelectrics. 2010. V. 398. P. 108.

А.А. АНИКЬЕВ, М.Ф. УМАРОВ¹, Э.Н. АНИКЬЕВА²
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹*Вологодский государственный университет*
²*Мичуринский государственный аграрный университет, Тамбовская обл.*

АНОМАЛИИ ТЕПЛОЁМКОСТИ И ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ С ДЕФЕКТАМИ СТЕХИОМЕТРИИ

Получены спектры квазиупругого рассеяния света на полносимметричных колебаниях в совершенных (стехиометрических) и конгруэнтных кристаллах ниобата лития различной степени дефектности. Анализ спектров в области частот 10 - 70 см⁻¹ на образцах кристаллов с различной величиной акустической добротности показал аномалии плотности состояний в интервале 40 - 60 см⁻¹, которые не могут быть объяснены в рамках модели связи мягкой моды с релаксатором. Эволюция спектров при возрастании степени дефектности хорошо аппроксимируется данной моделью. Поскольку в конгруэнтных кристаллах ниобата лития с наведённой при выращивании плотностью дислокаций, квазиупругое рассеяние определяет плотность состояний, мы имеем аномалию теплоёмкости, вызванную нарушением стехиометрии состава в конгруэнтном кристалле.

А.А. ANIKIEV, M.F. UMAROV¹, E.N. ANIKIEVA²
Bauman Moscow State Technical University
¹*Vologda State University*
²*Michurinsk State Agrarian University, Tambov region*

HEAT CAPACITY ANOMALIES AND DENSITY OF STATES IN LITHIUM NIOBATE CRYSTALS WITH STOICHIOMETRY DEFECTS

Spectra of quasi-elastic light scattering by fully symmetric vibrations in perfect (stoichiometric) and congruent lithium niobate crystals of various degrees of defectiveness are obtained. An analysis of the spectra in the frequency range 10 - 70 cm⁻¹ on crystal samples with different acoustic Q-factors showed anomalies in the density of states in the range 40 - 60 cm⁻¹, which cannot be explained in terms of the model of soft mode coupling with a relaxer. The evolution of the spectra with an increase in the degree of imperfection is well approximated by this model. Since in congruent lithium niobate crystals with a dislocation density induced during growth, quasi-elastic scattering essentially determines the density of states, we have an anomaly in the heat capacity, caused by a violation of the stoichiometry of the composition in a congruent crystal.

Целью настоящей работы является изучение особенности квазиупругого рассеяния света в образцах ниобата лития, полученных в условиях выращивания, способствующих образованию нелокальных дефектов стехиометрии – дислокаций, границ зёрен, блоков кристаллитов.

Условия выращивания и параметры образцов кристаллов ниобата лития подробно описаны в работе [1]. Здесь только уместно заметить, что условия выращивания конгруэнтных кристаллов с высокими скоростями вытягивания предполагали повышенную вероятность образования высоких плотностей дислокаций. Для всех образцов была определена акустическая добротность из измерений коэффициента поглощения звука.

Измерение интенсивности квазиупругого рассеяния света на образцах ниобата лития с различной акустической добротностью показало, что с ростом акустического поглощения, начинает проявляться аномалия интенсивности в интервале частот $40 - 60 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1). Возрастание интенсивности рассеяния на акустических колебаниях связано с ростом концентрации дефектов и соответственно расширением области зоны Бриллюэна, дающей вклад в рассеяние света первого порядка. Данное наблюдение подтверждает наше предположение о проявлении плотности акустических состояний в спектрах КРС за счёт нарушения правил отбора по волновому вектору. Поскольку по плотности состояний можно восстановить удельную теплоёмкость образца, то можно предположить, что аномалия плотности состояний может быть вызвана дефектами стехиометрии, а именно образованием блоков сложного состава в дополнение к дислокациям и другим крупномасштабным дефектам.

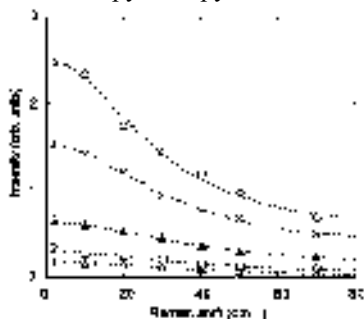


Рис. 1. Интенсивность квазиупругого рассеяния света в образцах ниобата лития различной добротности Q : 1 - $1.45 \cdot 10^4$; 2 - $1.17 \cdot 10^4$; 3 - $0.85 \cdot 10^4$; 4 - $0.52 \cdot 10^4$; 5 - $0.35 \cdot 10^4$, пунктирной линией показаны результаты аппроксимации

Список литературы

1. Anikiev A.A., Sidorov N.V., Palatnikov M.N., et al. // Opt. Mater. 2021. V. 111. P. 110729.

М.В. СМІРНОВ, Р.А. ТИТОВ, Н.В. СІДОРОВ,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ, Н.А. ТЕПЛЯКОВА

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3 , ЛЕГИРОВАННЫХ КАТИОНАМИ Zn^{2+} И V^{3+}

Проведён анализ зависимости доли диффузионной компоненты поля от длины волны лазерного излучения и фотолюминесценции в видимой области кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$, $\text{LiNbO}_3(0.55$ и 0.83 мол. % V_2O_5 в шихте) и $\text{LiNbO}_3(0.04$ и 2.01 мол. % ZnO в кристалле). Наблюдается слабая корреляция доли E_D от свечения биполярона $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ в данных кристаллах за счёт вклада иных дефектов в компоненту E_D в раскрытии индикатрисы ФИРС.

M.V. SMIRNOV, R.A. TITOV, N.V. SIDOROV,
M.N. PALATNIKOV, N.A. TEPLYAKOVA

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

OPTICAL PROPERTIES OF LiNbO_3 CRYSTALS DOPED BY Zn^{2+} AND V^{3+} CATIONS

The dependence of field diffusion component fraction on the laser radiation wavelength and photoluminescence in the visible region of $\text{LiNbO}_{3\text{stech}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{cong}}$, $\text{LiNbO}_3(0.55$ and 0.83 mol % V_2O_5 in a charge) and $\text{LiNbO}_3(0.04$ and 2.01 mol % ZnO in the crystal). There is a weak correlation between E_D fraction and $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ emission in the crystals due to the contribution of other defects to E_D in opening FIRS indicatrix.

Нелинейно-оптический монокристалл ниобата лития (LiNbO_3) на протяжении многих лет является востребованным сегнетоэлектрическим материалом для создания на его основе устройств для преобразования лазерного излучения, модуляторов и др. [1]. Осуществить влияние на особенности кислородно-октаэдрической структуры кристалла LiNbO_3 и, как следствие, регулировать его оптические характеристики возможно путём направленного легирования шихты конгруэнтного состава ($\text{Li}/\text{Nb} = 0.946$) нефоторефрактивными катионами металлов (Zn^{2+} , Mg^{2+} и других) и неметаллов (V^{3+}) [1, 2]. В данной работе методами фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС, расчёт фотоэлектрического (E_{pv}) и диффузионного (E_D) полей) и

фотолюминесценции исследованы оптические свойства кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$, LiNbO_3 (0.55 и 0.83 мол. % B_2O_3 в шихте) и LiNbO_3 (0.04 и 2.01 мол. % ZnO в кристалле).

На рис. 1а представлена доля вклада E_D в раскрытие индикатрисы ФИРС в зависимости от длины волны лазерного излучения, а на рис. 1б – интегральная интенсивность фотолюминесценции исследованных кристаллов. Вклад E_D для кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ линейен и больше вклада E_D прочих кристаллов, кроме кристалла $\text{LiNbO}_3\text{:B}$ (0.55 мол. % B_2O_3 в шихте) при длине волны 476.5 нм (рис. 1а). Это свидетельствует о наименьшем количестве дефектов Nb_{Li} в структуре кристалла $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$. Доля E_D в кристаллах LiNbO_3 (0.55 и 0.83 мол. % B_2O_3 в шихте) зеркально отличается друг от друга, рис. 1а. Поведение зависимостей для кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ и LiNbO_3 (0.04 и 2.01 мол. % ZnO в кристалле) схожи, рис. 1а.

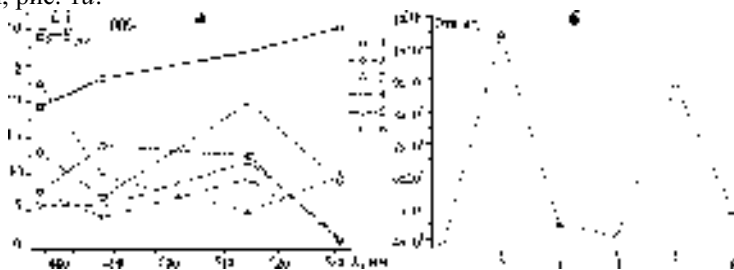


Рис. 1. Вклад E_D в раскрытие индикатрисы ФИРС в %, (а) и интегральная интенсивность фотолюминесценции в отн.ед. (б) кристаллов $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$ (1), $\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$ (2), LiNbO_3 (0.55 (3) и 0.83 (4) мол. % B_2O_3 в шихте) и LiNbO_3 (0.04 (5) и 2.01 (6) мол. % ZnO в кристалле)

Фотолюминесценция обусловлена биполяронами $\text{Nb}_{\text{Li}}\text{-Nb}_{\text{Nb}}$ (~ 600 нм) и их эмиссия минимальна в кристаллах $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$, LiNbO_3 (0.55 и 0.83 мол. % B_2O_3 в шихте) среди других кристаллов (рис. 1б), что говорит об их меньшей дефектности относительно Nb_{Li} . Легирование цинком в диапазоне 0.04 - 2.01 мол.% ZnO приводит к уменьшению интенсивности свечения биполярона за счёт изоморфного замещения дефекта Nb_{Li} . Корреляция интенсивности свечения биполярона и E_D практически не проявляется. Это, по-видимому, связано с типом допирующего компонента, его концентрацией и, кроме того, участием других дефектов (V_{Li} , OH-группы и др.) в формировании величины E_D данных кристаллов.

Список литературы

1. Palatnikov M.N., Sidorov N.V., et al. // J. Am. Ceram. Soc. 2017. V. 100. P. 3703-3711.
2. Sidorov N.V., Teplyakova N.A., et al. // Crystals. 2021. V. 11. No. 5. P. 458.

А.А. АНИКЬЕВ, М.Ф. УМАРОВ¹, Э.Н. АНИКЬЕВА²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана**¹Вологодский государственный университет**²Мичуринский государственный аграрный университет, Тамбовская обл.*

ФЛУКТУАЦИИ ФОНОННОЙ ПЛОТНОСТИ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Получены спектры квазиупругого и комбинационного рассеяния света в интервале температур 296 - 980 К конгруэнтных кристаллов ниобата лития различной степени дефектности. Проведён количественный анализ спектров в интервале частот 10 - 300 см⁻¹ для образцов в модели, учитывающей связь низкочастотной оптической моды А₁(ТО) – типа симметрии с плотностью акустических состояний, описываемой собственно-энергетической частью в системе уравнений для функций Грина, с учётом влияния дефектов стехиометрии. Показано, что в образовании динамического центрального пика при структурном фазовом переходе в кристаллах ниобата лития существенную роль играет дефекты и возможность образования связанных состояний акустических фононов в поле дислокаций.

А.А. ANIKIEV, M.F. UMAROV¹, E.N. ANIKIEVA²*Bauman Moscow State Technical University**¹Vologda State University**²Michurinsk State Agrarian University, Tambov region*

PHONON DENSITY FLUCTUATIONS IN LITHIUM NIOBATE NEAR A PHASE TRANSITION

The spectra of quasi-elastic and Raman scattering of light in the temperature range 296 - 980 K of congruent lithium niobate crystals of various degrees of defectiveness were obtained. Quantitative analysis of the spectra in the frequency range 10 - 300 cm⁻¹ was carried out for the samples in a model that takes into account the relationship of the low-frequency optical mode А₁(TO) of the symmetry type with the density of acoustic states described by the self-energy part in the system of equations for the Green's functions, taking into account the influence stoichiometry defects. It is shown that defects and the possibility of formation of bound states of acoustic phonons in the field of dislocations play a significant role in the formation of a dynamic central peak during a structural phase transition in lithium niobate crystals.

Несмотря на большое число исследований спектров КРС [1 - 3], к настоящему времени остаётся нерешённым ряд важных вопросов,

которые являются предметом дискуссий и которые представляют интерес для дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

В данной работе с целью выяснения характера изменений в спектрах комбинационного и квазиупругого рэлеевского рассеяния света, обусловленных дефектами кристаллической решётки, а также взаимодействием оптических и акустических мод, выполнены исследования и анализ спектров КРС и квазиупругого рассеяния света кристаллов LiNbO_3 в области температур 296 - 980 К.

Исследовались кристаллы ниобата лития трёх типов, выращенные одним методом Чохральского в воздушной атмосфере: номинально чистые стехиометрические, выращенные из расплава с 58.8 мол. % Li_2O (тип III), конгруэнтные кристаллы ниобата лития, выращенные из конгруэнтного расплава с 48.6 мол. % Li_2O (тип II) и кристаллы, выращенные из конгруэнтного расплава с различными скоростями вытягивания затравки из расплава (тип I).

Из анализа спектров образцов трёх типов следует, что рост количества крупномасштабных дефектов, инициированных условиями выращивания в образцах типа I приводит к проявлению акустической плотности состояний в низкочастотной области спектра 5 - 200 см^{-1} связанному с нарушением правил отбора по волновому вектору во всей зоне Бриллюэна кристаллов.

При этом интенсивность низкочастотного спектра и акустической плотности состояний драматически возрастает с ростом температуры образцов. Количественное описание эволюции спектров низкочастотного и рэлеевского рассеяния было проведено путём решения замкнутой системы уравнений для одночастичной функции Грина, в которых собственно-энергетическая часть представляла собой рассчитанную из анализа дисперсионных кривых плотность невозмущённых состояний акустических фононов. Влияние дефектов учитывалось методом когерентного потенциала при вычислении T -матрицы. Полученные результаты хорошо описывали температурную эволюцию спектров, причём взаимодействие оптической моды 274 см^{-1} с акустической плотностью состояний происходило через затухание.

Список литературы

1. Lengyel K., Péter Á., et al. // Applied Physics Reviews. 2015. V. 2 (4). P. 040601.
2. Fontana M.D., Bourson P. // Appl. Phys. Rew. 2015. V. 2 (4). P. 040602.
3. Amikiev A.A., Umarov M.F., Scott J.F. // AIP Advances. 2018. V. 8. P. 115016.

Л.А. БОБРЕВА, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ДЕФЕКТОВ В КРИСТАЛЛАХ $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$

Методом ИК-спектроскопии поглощения в области валентных колебаний ОН-групп исследованы монокристаллы $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$. Установлено, что полосы поглощения с частотой 3526 и 3535 cm^{-1} , соответствуют гидроксильным колебаниям комплексного дефекта $\text{Mg}_{\text{Nb}}\text{-OH}$, $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Mg}_{\text{Nb}}$. Появление полосы поглощения с частотой 3585 cm^{-1} соответствует комплексному дефекту вида $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Gd}_{\text{Nb}}$. Формирование данного дефекта возможно при достижении пороговой концентрации редкоземельной примеси гадолиния ≈ 0.003 мас. %.

L.A. BOBREVA, N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

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

FEATURES OF THE FORMATION COMPLEX DEFECTS IN THE $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$ CRYSTALS

By IR absorption spectroscopy in the range of OH-group stretching vibrations were studied $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}:\text{Mg}$ single crystals. The absorption bands with a frequency of 3526 and 3535 cm^{-1} correspond to hydroxyl vibrations of the $\text{Mg}_{\text{Nb}}\text{-OH}$, $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Mg}_{\text{Nb}}$ complex defect. The appearance of an absorption band with a frequency of 3585 cm^{-1} corresponds to a complex defect of the $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Gd}_{\text{Nb}}$ type. The formation of this defect is possible when the threshold concentration of the rare-earth impurity of gadolinium reaches 0.003 wt %.

В настоящее время исследования тонких особенностей реальной дефектной структуры кристаллов двойного легирования LiNbO_3 является необходимым для создания высокосовёршённых нелинейно-оптических материалов с заданными оптимальными физическими характеристиками. В данной работе по спектрам ИК-поглощения в области валентных колебаний ОН-групп исследованы особенности дефектной структуры в кристаллах $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}(0.002):\text{Mg}(0.4 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}(0.003):\text{Mg}(0.65 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3:\text{Gd}(0.25):\text{Mg}(0.75 \text{ мас. \%})$.

Двойное легирование кристалла LiNbO_3 даёт возможность более тонко регулировать упорядочение структурных единиц катионной подрешётки [1, 2], повышать стехиометрию кристалла. Вхождение катионов Mg^{2+} при

достижении порогового значений (~ 3.0 мол. % MgO) в кристаллах LiNbO_3 двойного легирования приводит к вытеснению дефектов Nb_{Li} и замещению базовых катионов Nb^{5+} , что приводит к сдвигу частот в длинноволновую область на ИК-спектре (рис. 1). Полосы поглощения с частотой 3526 и 3535 см^{-1} соответствуют гидроксильным колебаниям комплексного дефекта $\text{Mg}_{\text{Nb}}\text{-OH}$, $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Mg}_{\text{Nb}}$. Вхождение катионов Gd^{3+} в кристаллах LiNbO_3 двойного легирования приводит к вытеснению основных позиций Nb^{5+} при концентрации данной легирующей примеси ≈ 0.003 мас. %. На ИК-спектрах регистрируется полоса поглощения с частотой 3585 см^{-1} (кривая 2 на рис. 1), соответствующая комплексному дефекту $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Gd}_{\text{Nb}}$. При концентрации катионов Gd выше этого значения, а так же увеличении концентрации катионов магния на ИК-спектрах не регистрируется полоса поглощения, отвечающая комплексному дефекту вида $\text{Mg}_{\text{Li}}\text{-OH-Gd}_{\text{Nb}}$.

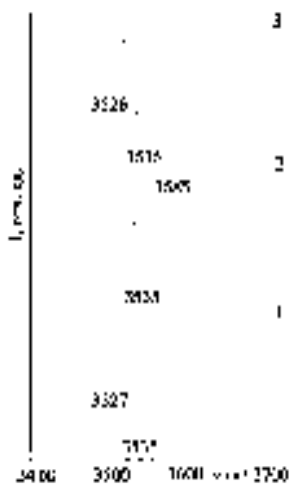


Рис. 1. Спектры ИК-поглощения $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}(0.002 \text{ мас. \%})\text{:Mg}(0.4 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}(0.003 \text{ мас. \%})\text{:Mg}(0.65 \text{ мас. \%})$, $\text{LiNbO}_3\text{:Gd}(0.25 \text{ мас. \%})\text{:Mg}(0.75 \text{ мас. \%})$

Список литературы

1. Yang X., Xu G., et al. // *Crystal Research and Technology*. 1996. V. 31. No. 4. P. 521-525.
2. Палатников М.Н., Сидоров Н.В. и др. *Фундаментальные аспекты технологии сильно легированных кристаллов ниобата лития. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2017.*

И.А. МУРАВЬЕВ, С.Г. ГРЕЧИН¹

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗОСИНХРОННЫХ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛА ВВО

Приведены результаты расчётов углов фазового синхронизма (ФС) кристалла ВВО во всём диапазоне прозрачности для всех типов взаимодействия. Получены значения температурных ширин синхронизма вдоль направлений ФС. Определено, что во всём диапазоне прозрачности синхронизм является критичным по температуре. Определены процессы нелинейно-оптического преобразования и соответствующие комбинации длин волн, для которых температурная ширина ФС превышает 100 °С·см.

I.A. MURAVEV, S.G. GRECHIN¹

Bauman Moscow State Technical University

¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

TEMPERATURE DEPENDENCES OF THE BBO CRYSTAL PHASE-MATCHING PROPERTIES

The results of calculations of the phase-matching (PhM) angles of the BBO crystal in the transparency range for all types of interaction are presented. The temperature widths of phase-matching were defined for all frequency conversion processes. It was determined that the phase-matching is temperature-critical in all crystal transparency range. Nonlinear-optical conversion processes and combinations of the wavelengths for which the temperature width of phase-matching exceeds 100 °С·cm have been defined.

Благодаря своим превосходным оптическим свойствам бета-бариевый борат (ВВО, β -BaB₂O₄) является одним из самых популярных нелинейных кристаллов. Этот кристалл используется для формирования излучения в ультрафиолетовом и видимом диапазонах, а также в параметрических генераторах [1].

Важным вопросом является определение температурных ширин синхронизма, что позволяет установить возможность получения процессов с высоким уровнем средней мощности. Имеются отдельные данные для генерации второй, третьей, четвёртой и пятой гармоник. До настоящего времени не были определены значения температурных ширин для всего диапазона прозрачности кристалла. Полученные в [2] зависимости для температурных производных главных значений

показателей преломления dn_i/dT дают возможность провести расчёты температурных ширин синхронизма вдоль направлений ФС кристалла ВВО во всём диапазоне прозрачности, что и является целью работы.

На рис. 1 и 2 приведены распределения температурных ширин синхронизма вдоль направлений ФС для первого и второго типов взаимодействия соответственно. Определено, что во всём диапазоне прозрачности синхронизм является критичным по температуре. Но в достаточно большом диапазоне длин волн существуют такие их комбинации, при которых температурная ширина превышает $100\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{см}$ (области жёлтого, оранжевого и красного цветов). Максимальные значения ширин (до $140\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{см}$, красный цвет) могут быть получены преимущественно для процессов генерации второй гармоники излучения с длиной волны 1,6 - 2,4 мкм для первого типа синхронизма. Также большие значения температурных ширин могут быть получены при параметрической генерации с накачкой на длине волны в области 0,8 - 1,3 мкм.

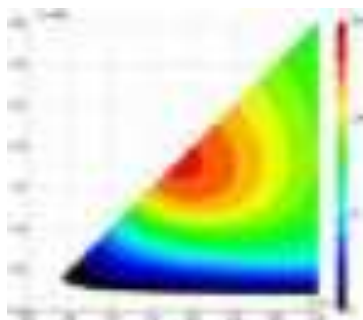


Рис. 1. Температурные ширины синхронизма для ooe

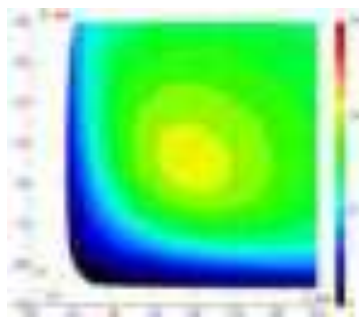


Рис. 2. Температурные ширины синхронизма для ooe/eoe

Предварительные оценки показывают, что при таких значениях температурных ширин синхронизма возможно формирование излучения со средней мощностью не менее 100 Вт.

Список литературы

1. Tamošauskas G., Beresnevičius G., et al. Transmittance and phase matching of BBO crystal in the 3 - 5 μm range and its application for the characterization of mid-infrared laser pulses // Optical Materials Express. 2018. V. 8 (6). P. 1410-1418.
2. Kato K., Umemura N., et al. Sellmeier and thermo-optic dispersion formulas for Beta-BaB₂O₄ // Proc. SPIE. 2010. V. 7582. P. 396-401.

В.Н. НАВНЫКО, Д.С. БЛОЦКАЯ, Г.В. КУЛАК, С.М. ШАНДАРОВ¹

*Мозырский государственный педагогический университет
им. И.П. Шамякина, Беларусь*

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

САМОДИФРАКЦИЯ СВЕТОВЫХ ВОЛН ПРИ ИХ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В КРИСТАЛЛЕ GaAs СРЕЗА (001)

Проанализирована зависимость относительной интенсивности предметной волны от её азимута линейной поляризации и ориентационного угла при встречном двухволновом взаимодействии световых волн в кристалле GaAs среза (001). Теоретические расчёты выполнены в динамическом и статическом приближениях. Показано, что самодифракция световых волн приводит к изменению направления энергетического обмена при встречном взаимодействии световых волн.

V.N. NAUNYKA, D.S. BLOTSKAYA, G.V. KULAK, S.M. SHANDAROV¹

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

¹*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

SELF-DIFFRACTION OF LIGHT WAVES AT THEIR CONTRA-DIRECTION MIXING IN GaAs CRYSTAL OF (001)-CUT

The dependence of the relative intensity of the object wave on its linear polarization azimuth and orientation angle in the case of contra-direction two-wave mixing GaAs crystal of (001)-cut is analyzed. Theoretical calculations are made in dynamic and static approximations. It is shown that self-diffraction of light waves can lead to a change in the direction of energy exchange in the case of contra-direction mixing of light waves.

Целью исследования являлось изучение влияния эффекта самодифракции на энергетический обмен при встречном двухволновом взаимодействии линейно поляризованных световых волн в фоторефрактивном кристалле GaAs среза (001). Принятая к рассмотрению геометрия двухволнового взаимодействия и использованные для расчётов уравнения связанных волн приведены в [1]. Предполагалось, что опорная волна линейно поляризована в плоскости падения, а входной азимут линейной поляризации ψ_s предметной волны и ориентационный угол θ кристалла являлись переменными. Толщина кристалла считалась равной 3,73 мм. В теоретической модели принимались во внимание линейный электрооптический, фотоупругий и обратный пьезоэлектрический эффекты, а также поглощение света кристаллом.

Как следует из рис. 1а при решении уравнений связанных волн, приведённых в [1], в статическом приближении (без учёта самодифракции) относительная интенсивность γ предметной волны, определяемая как отношение интенсивности предметной волны на выходе из кристалла к её интенсивности на входе кристалла, остается неизменной в том случае, когда азимут поляризации ψ_s линейно увеличивается при возрастании ориентационного угла θ . Наибольшие значения относительной интенсивности γ достигаются в локальных максимумах зависимости $\gamma(\psi_s, \theta)$, обозначенных на рис. 1а линиями b_1 и b_2 . Наименьшие значения γ соответствуют локальным минимумам зависимости $\gamma(\psi_s, \theta)$, которые совпадают с линиями a_1 и a_2 на рис. 1а.

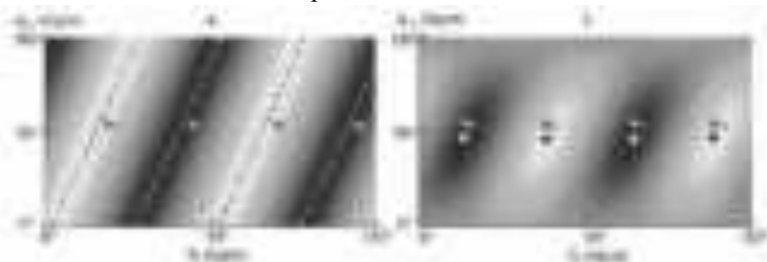


Рис. 1. Зависимости относительной интенсивности γ от азимута ψ_s и угла θ , рассчитанные в статическом (а) и динамическом (б) приближениях

Учёт эффекта самодифракции при численном решении уравнений связанных волн обуславливает качественное изменение зависимости $\gamma(\psi_s, \theta)$, когда в статическом приближении поверхность принимает волнообразную структуру (рис. 1а), а в динамическом приближении поверхность приобретает пикообразный вид (рис. 1б). Наибольшие и наименьшие значения относительной интенсивности на рис. 1б достигаются соответственно в точках V_1 , V_2 и A_1 , A_2 . Значениям азимута поляризации ψ_s и ориентационного угла θ , при которых в динамическом приближении достигаются максимумы и минимумы относительной интенсивности, в статическом приближении, наоборот, им соответствуют минимумы и максимумы параметра γ . Таким образом, самодифракция световых волн на формируемой в кристалле GaAs среза (001) голографической решётке может приводит к изменению направления энергетического обмена при встречном взаимодействии световых волн.

Список литературы

1. Навныко В.Н., Шепелевич В.В., Шандаров С.М. // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. № 1. С. 66-74.

В.В. ДАВЫДОВСКАЯ, В.Н. НАВНЫКО

*Мозырский государственный педагогический университет
им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь*

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУМЕРНЫХ СУПЕРГАУССОВЫХ ПУЧКОВ В УПОРЯДОЧЕННЫХ МАССИВАХ В ФОТОРЕФРАКТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ SBN

В работе выполнено теоретическое обоснование использования упорядоченных систем солитонов, состоящих из уединённых массивов четырёх пучков, для использования каждого пучка в качестве канала передачи информации.

V.V. DAVYDOUSKAYA, V.N. NAUNYKA

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Mozyr, Belarus

SPECIFIC FEATURES OF THE INTERACTION OF TWO-DIMENSIONAL SUPER GAUSSIAN BEAMS IN ORDERED ARRAYS IN A PHOTOREFRACTIVE SBN CRYSTAL

The paper provides a theoretical justification for the use of ordered systems of solitons, consisting of solitary arrays of four beams, for using each beam as an information transmission channel.

Исследования распространения и взаимодействия упорядоченных систем солитонов в фоторефрактивных кристаллах представляют значительный интерес, так как они являются перспективными для применения в системах оптической передачи данных, а также обработки информации с использованием каждого светового пучка в качестве отдельного информационного канала. К настоящему времени уже существует достаточно большое количество работ, содержащих экспериментальное исследование массивов световых пучков, так называемое мультисолитонное взаимодействие (например, [1 - 3]).

Авторами уже было детально исследовано взаимодействие, двумерных световых пучков, входящих в симметричный массив из четырёх пучков. Было отмечено, что при взаимодействии четырёх 2×2 симметрично расположенных двумерных супергауссовых световых пучков происходит стабилизация квазисолитонного режима распространения каждого из пучков, входящих в массив (например, [4]).

Представляет так же интерес исследование взаимодействия массива удвоенного размера 4×4 , состоящего из двумерных супергауссовых световых пучков шириной каждого 25 мкм и расстояниями между соседними пучками, равными ширине пучка, при их симметричном расположении относительно центра входной грани фоторефрактивного кристалла SBN толщиной 20 мм, к которому вдоль оптической оси приложено внешнее электрическое поле с напряжённостью $E_0 = 2,5$ кВ/см.

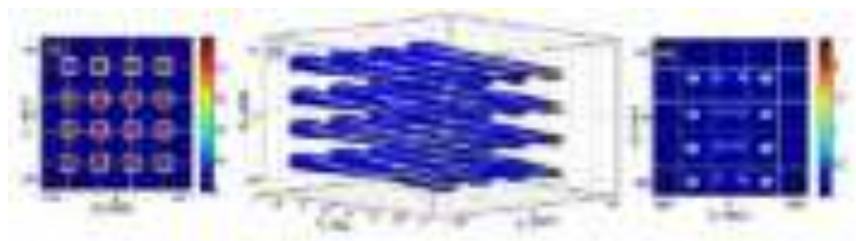


Рис. 1. Распространение массива 4×4 прямоугольных двумерных световых пучков в фоторефрактивном кристалле SBN: массив пучков на входе в кристалл (а); трёхмерная модель распределения светового поля по толщине кристалла (б); результат теоретического моделирования пучков на выходе из кристалла (в)

Из рис. 1 видно, что на средние ряды пучков оказывается большее влияние соседних пучков массива, вследствие парного взаимодействия данные пучки рассеиваются, однако вносят вклад в относительную интенсивность крайних пучков. Диффузионный режим распространения приводит к смещению массива противоположно направлению внешнего электрического поля, приложенного к кристаллу вдоль оси x , причём нижние пучки смещаются в большей степени.

Следует отметить, что для использования каждого пучка в качестве информационного канала, следует использовать упорядоченные массивы из уединённых базовых массивов 2×2 , с увеличенным расстоянием между крайними пучками базовых массивов.

Список литературы

1. Khmel'nitsky D. // *Ferroelectrics*. 2009. V. 390. P. 116-127.
2. Smirnov S. // *Opt. Lett.* 2007. V. 32(5). P. 512-514.
3. Zeng L. // *Commun. Phys.* 2020. V. 3. P. 20-29.
4. Давыдовская В.В. // материалы XIV Междунар. науч.-практ. интернет-конф., Мозырь, 2022. С. 217-220.

В.Г. ДЮ, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ, Ю.Ф. КАРГИН¹
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных зависимостей фотоиндуцированных изменений в оптическом поглощении в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$, подвергнутом последовательной засветке непрерывным излучением лазера с $\lambda_i = 532$ нм и светодиодов с различными длинами волн в диапазоне $\lambda_n = 588 - 940$ нм.

V.G. DYU, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV, Yu.F. KARGIN¹
¹*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*
²*Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow*

PHOTOINDUCED CHANGES OF OPTICAL ABSORPTION IN $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ CRYSTAL

The results of experimental studies of the spectral dependences of photoinduced changes in optical absorption in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ crystal subjected to sequential illumination by cw laser radiation first with wavelength $\lambda_i = 532$ nm and then by LEDs with different wavelengths in the range $\lambda_n = 588 - 940$ nm are presented.

Фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в кристаллах силленитов связаны с наличие структурных дефектов, при этом изменение стехиометрии или легирование примесями приводит к модификации их оптических свойств [1].

В данной работе представлены результаты исследования фотоиндуцированного поглощения в легированном кальцием и галлием кристалле титаната висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ ($d = 8,75$ мм), подвергнутом последовательной засветке коротковолновым излучением на длине волны $\lambda_i = 532$ нм и более длинноволновым излучением на дискретных длинах волн из диапазона $\lambda_n = 588 - 940$ нм. Облучение кристалла на всех этапах осуществлялось до насыщения в спектрах поглощения.

Получено, что экспозиция лазерным излучением с длиной волны $\lambda_i = 532$ нм и интенсивностью $I_i = 36$ мВт/см² на входной грани кристалла в течение 2400 с, используемая на первом этапе, приводит к увеличению оптического поглощения $k(\lambda)$ и неизменной его форме в спектральном

диапазоне 415 - 900 нм. Последующая длинноволновая засветка с использованием светодиодов с $\lambda_n = 588 - 940$ нм приводит к просветлению кристалла. Экспериментальные спектральные зависимости изменений в оптическом поглощении $\Delta k(\lambda)$ при просветлении кристалла, предварительно экспонированного светом с $\lambda_i = 532$ нм, достигаемые его последующей засветкой более длинноволновым излучением с $\lambda_n = 588, 655, 880$ и 940 нм представлены на рис. 1.

Спектральные зависимости $\Delta k(\lambda)$ демонстрируют резонансный характер, характеризующиеся тремя широкими полосами с экстремумами при $\lambda_e = 438, 528$ и 700 нм. Как видно из рис. 1, облучение образца излучением светодиода с $\lambda_n = 588$ нм приводит к максимальному просветлению в диапазоне от 415 до 600 нм. В диапазоне 600 - 800 нм максимальное просветление наблюдается после облучения с $\lambda_n = 880$ нм. С увеличением длины волны просветляющей засветки величина максимальных изменений показателя поглощения $\Delta k_{max} = \Delta k_i - \Delta k_n$ в полосе с экстремумом при $\lambda_e = 528$ нм уменьшается по закону, близкому к линейному (рис. 2).

Наблюдаемые фотоиндуцированные изменения оптического поглощения в кристалле $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ были аппроксимированы в рамках модели примесного поглощения, учитывающей вклады фотовозбуждения электронов в зону проводимости с глубоких донорных центров и внутрицентровых переходов [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Госзадания FEWM-2020-0038/3 на 2020-2022 годы.

Список литературы

1. Marinova V., Lin S.H., et al. In: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016. P. 1-20.
2. Kisteneva M.G., et al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45. P. 685.

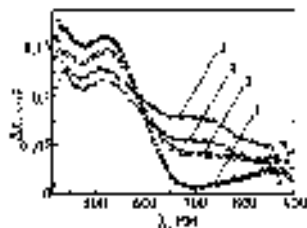


Рис. 1. Спектры оптического просветления в кристалле, предварительно облучённом зелёным светом, наблюдаемые после насыщающей засветки на длинах волн 588 нм (1), 655 нм (2), 880 нм (3) и 940 нм (4)

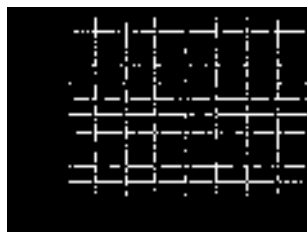


Рис. 2. Зависимость изменений показателя поглощения $\Delta k_{max}(\lambda_{in})$ от длины волны просветляющего излучения

С.Ф. НИЧИПОРКО

*Мозырский государственный педагогический университет
им. И.П. Шамякина, Мозырь, Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА ЭНЕРГООБМЕН ПРИ ДВУХВОЛНОВОМ
ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ СРЕЗА (111)**

Представлены результаты оптимизации относительной интенсивности сигнальной волны при двухволновом взаимодействии в кубическом фоторефрактивном кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (111) при приложении к нему внешнего постоянного электрического поля по поляризационному и ориентационному углам.

S.F. NICHIPORKO

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Mozyr, Belarus

**INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD ENERGY
EXCHANGE IN THE TWO-WAVE MIXING
IN CRYSTAL $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (111)-CUT**

Presents the result of optimization relative intensity of the signal wave in the two-wave mixing in cubic photorefractive crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ of (111)-cut under of external DC electric field out for polarization and orientation angles.

Двухволновое взаимодействие в кубических фоторефрактивных кристаллах для случая произвольной пространственной ориентации вектора голографической решётки, включая срез (111) исследовалось в [1]. Различные способы оптимизации относительной интенсивности сигнальной волны в кубических фоторефрактивных пьезокристаллах среза (111) в диффузионном режиме рассмотрены [2 - 4].

Целью работы является исследование влияния внешнего электрического поля, пьезоэлектрического эффекта и оптической активности на поляризационно-ориентационную оптимизацию относительной интенсивности сигнальной волны в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) среза (111).

При исследовании дифракции света в кубических пьезокристаллов произвольной толщины, при больших углах Брэгга и при приложении внешнего электрического поля необходимо учитывать перераспределение

энергии между световыми волнами при записи голограмм на амплитуду электрического поля голографической решётки [5].

На рис. 1 изображена зависимость максимальной относительной интенсивности γ^{\max} сигнальной волны от ориентационного угла θ в кристалле BSO толщиной 5.8 мм и угле Брэгга 11.5° , $I_R/I_S = 100$, остальные параметры кристалла взяты из [4]. Из рис. 1 следует, что абсолютные максимумы энергообмена достигаются при $\theta^{\max} = 2/3\pi$, что и наблюдалось в диффузионном режиме [4]. Учёт перераспределения энергии между взаимодействующими пучками при ориентационных углах, соответствующих абсолютным максимумам относительной интенсивности сигнальной волны, приводит к значительному увеличению значений γ^{\max} сигнальной волны, так при амплитуде поля $E_0 = 10 \text{ кВ/см}^2$ значение γ^{\max} увеличивается на 1.7 отн. ед. рис. 1 (кривая 4).

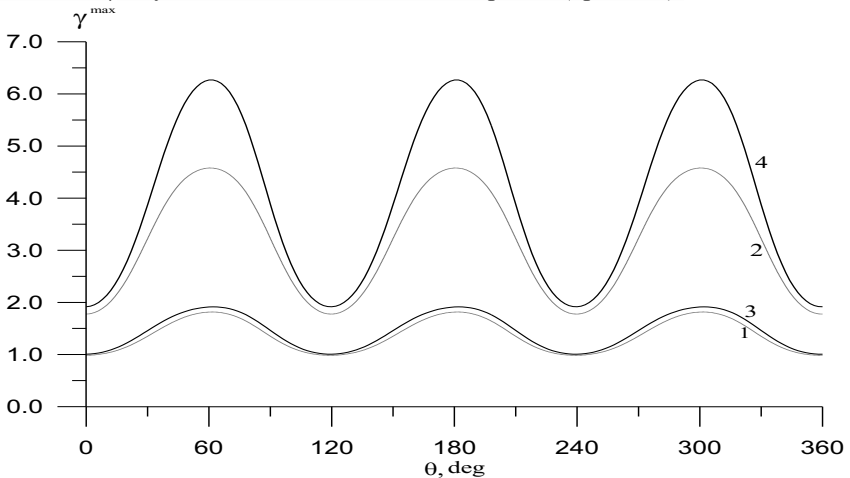


Рис. 1. Ориентационные зависимости максимальной относительной интенсивности γ^{\max} сигнальной волны в дрейфовом режиме:
штриховая линия – в приближении заданной решётки,
сплошная линия – с учётом самодифракции взаимодействующих волн,
 $E_0 = 5 \text{ кВ/см}^2$ (1, 2), $E_0 = 10 \text{ кВ/см}^2$ (3, 4)

Список литературы

1. Sugg B., Kahman F., et al. // Opt. Commun. 1993. V. 106. P. 6.
2. Shamonina E., Yi H., et al. // Opt. Commun. 2000. V. 180 (1-3). P. 183.
3. Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., et al. // Opt. Mat. 2001. V. 18 (1). P. 135.
4. Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., et al. // Ferroelectrics. 2002. V. 266. P. 305.
5. Шепелевич В.В., Фирсов А.А. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30 № 1. С. 60.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, А.М. ИВАНОВ,
С.В. МОЛЧАНОВ, В.С. СТЕПАНОВ

Тверской государственной университет

ВЛИЯНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРАТЕЛЛУРИТА

Согласно технологии изготовления полированных поверхностей элемента из монокристаллов парателлурифта, включающей химическое травление щёлочной средой, получены оптические поверхности на плоскостях (100), (110) и (001). Проведены профилометрические исследования и рассчитаны параметры шероховатости.

S.A. TRETIAKOV, I.A. KAPLUNOV, A.M. IVANOV,
S.V. MOLCHANOV, V.S. STEPANOV

Tver State University

INFLUENCE OF CRYSTALLOGRAPHIC DIRECTIONS ON THE ROUGHNESS PARAMETERS OF POLISHED SURFACE OF PARATELLUTITE

According to the technology for manufacturing polished surfaces of an element from paratellurite single crystals, including chemical etching in alkaline medium, optical surfaces were obtained on the planes (100), (110), and (001). Profilometric studies have been carried out and the roughness parameters have been calculated.

В большом перечне типов акустооптических устройств в качестве светозвукопровода применяются монокристаллы парателлурифта. При изготовлении элементов из данных кристаллов, помимо важности структурного качества материала, актуальной задачей является вопрос обработки оптических поверхностей. Это обусловлено требованием минимизации оптических потерь при отражении и диффузионном рассеянии, так как при проектировании современных устройств увеличение коэффициента пропускания на 1-2% уже является значительным улучшением характеристик прибора.

Целью настоящей работы было провести профилометрические исследования полированных с использованием технологии химического подтравливания слабым раствором NaOH поверхностей, соответствующих различным кристаллографическим плоскостям. Для исследований были

выбраны плоскости (100), (110) и (001). Полировка производилась вручную при одинаковых условиях, для оценки параметров шероховатости измерения проводились на оптическом профилометре NanoMap 1000WLI, а получение численных значений параметров осуществлялось с помощью программного обеспечения Gwyddion. Для каждой плоскости измерения проводились по пяти точкам, часть результатов представлены в табл. 1, где указаны минимальные и максимальные значения параметров.

Таблица 1

Плоскости	001	100	110
Средняя шероховатость (Sa), μm	633,49-892,77	571,39-756,53	264,26-552,27
Максимальная высота (Sz), nm	6,211-8,489	6,951-7,822	2,350-5,852
Средняя шероховатость (Ra), μm	507,24-943,68	260,28-359,69	166,03-268,02
Среднеквадратичная шероховатость (Rq), μm	611,54-1171,55	332,51-414,75	211,90-336,29
Максимальная высота шероховатости (Rt), nm	2,874-6,172	1,928-2,136	1,129-1,965
Средняя максимальная глубина долины шероховатости (Rvm), nm	1,009-2,686	0,693-1,071	0,380-0,727
Средняя максимальная высота пика шероховатости (Rpm), nm	1,078-2,012	0,823-0,834	0,455-0,806
Средняя максимальная высота профиля (Rz), nm	2,329-5,403	1,705-1,927	1,056-1,732
Средняя волнистость (Wa), μm	387,64-880,64	475,26-646,19	145,42-274,01
Среднее расстояние между неровностями профиля (Sm), μm	14,300-18,954	16,544-19,236	12,515-17,243

Разница в значениях параметров шероховатости для различных кристаллографических плоскостей обусловлена соответствующими значениями поверхностной энергии.

О.Н. ШЕВЧЕНКО^{1,2}, С.Л. МИКЕРИН², К.А. КОХ³,
Н.А. НИКОЛАЕВ²

¹Новосибирский государственный университет

²Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ GaSe:S ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования кристаллов GaSe_{1-x}S_x, где $x = 0, 0.03, 0.12, 0.16$ и 0.22 , в качестве электрооптического детектора терагерцовых (ТГц) волн с использованием фемтосекундного (фс) лазерного излучения на длине волны $1,55$ мкм. Были измерены зависимость от концентрации серы показателей преломления на длине волны $1,55$ мкм и в ТГц-области, эффективность детектирования ТГц-волн и значение электрооптических коэффициентов. Показано, что на длине волны лазерного излучения $1,55$ мкм кристалл со значением $x = 0.12$ показывает наибольшую эффективность детектирования ТГц-излучения и обладает наибольшим значением электрооптического коэффициента $r_{22} = 1.262$ пм/В.

O.N. SHEVCHENKO^{1,2}, S.L. MIKERIN², K.A. KOKH³,
N.A. NIKOLAEV²

¹Novosibirsk State University

²Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk

³V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the SB RAS, Novosibirsk

PROSPECTS FOR THE USE OF GASE:S CRYSTALS FOR NEXT-GENERATION TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS

The use of GaSe_{1-x}S_x crystals, where $x = 0, 0.03, 0.12, 0.16$ and 0.22 , as an electro-optical detector of terahertz (THz) waves using femtosecond (fs) laser pulses with a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ is investigated. The properties of crystals in the optical and terahertz ranges were measured, such as refractive indices, coherence lengths and electro-optical coefficients. At a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ of laser radiation, the crystal with a value of $x = 0.12$ shows the highest efficiency of detecting THz radiation, and the highest value of the electro-optical coefficient was estimated to be $r_{22} = 1.262 \text{ pm/V}$.

В работе предлагается рассмотреть применение кристаллов селенида галлия, легированных серой в качестве нелинейного элемента,

обеспечивающего взаимодействие оптических телекоммуникационных длин волн и субтерагерцовых частот для оценки перспектив их интеграции в телекоммуникационные устройства следующего поколения. В данной работе это сделано на примере экспериментального исследования эффективности детектирования терагерцовых волн, несущих спектр частот 0,2 - 1,5 ТГц, фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 1,55 мкм в кристаллах $\text{GaSe}_{1-x}\text{S}_x$ с различной степенью легирования элементом серы ($x = 0, 0.03, 0.12, 0.16$ и 0.22).

Были измерены показатели преломления образцов в телекоммуникационном (1547 нм) и терагерцовом (0,2 - 2 ТГц) диапазонах и рассчитаны длины когерентности нелинейного взаимодействия соответствующих длин волн в представленных образцах.

Эффективность детектирования ТГц-излучения исследована в схеме импульсного спектрометра на базе фемтосекундного волоконного Ег лазера ($\lambda = 1550$ нм). В результате исследования показано, что наибольшая эффективность детектирования ТГц-волн наблюдается в кристалле $\text{GaSe}_{0.88}\text{S}_{0.12}$.

Впервые произведена оценка электрооптического коэффициента кристаллов GaSe:S на длине волны равной 1,55 мкм, который составил $r_{22} = 0,975$ пм/В для GaSe и $r_{22} = 1,262$ пм/В для $\text{GaSe}_{0.88}\text{S}_{0.12}$, что хорошо согласуется с результатами работ на других длинах волн [1, 2].

Таким образом, обсуждаются перспективы применения кристаллов селенида галлия для конструирования телекоммуникационных оптических устройств с частотами модуляции в диапазоне 100 - 1000 ТГц.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проекты № FSUS-2020-0029 (определение перспектив применения кристалла GaSe для систем передачи больших данных) и № 121032400052-6 (измерение ТГц и оптических свойств кристалла GaSe).

Авторы выражают благодарность ЦКП «Спектроскопия и оптика» ИАиЭ СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ за предоставленное оборудование.

Список литературы

1. Cingolani, Ferrara M., Lugara M., Lévy F. // Solid State Commun. 1989. V. 29 (9). P. 677-679.
2. Song, Qi, Chai, et al. // Infrared Physics & Technology. 2018. V. 97.

А.А. АНИКЬЕВ, Н.В. БАРЫШНИКОВ, Э.Н. АНИКЬЕВА¹
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹*Мичуринский государственный аграрный университет, Тамбовская обл.*

ДВИЖЕНИЕ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В ПОТЕНЦИАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Рассмотрены подходы к расчёту волновых функций и уровней энергии волновых пакетов в периодическом потенциале различной формы. Внимание обращено на проблему выбора новых переменных для корректного учёта граничных условий при решении уравнений Шредингера с различными потенциалами. Обсуждается возможность учёта фазы волновой функции в задачах квантовой теории излучения.

A.A. ANIKIEV, N.V. BARYSHNIKOV, E.N. ANIKIEVA¹
Bauman Moscow State Technical University
¹*Michurinsk State Agrarian University, Tambov region*

MOTION OF A WAVE PACKAGE IN POTENTIALS OF DIFFERENT FORMS

Approaches to the calculation of wave functions and energy levels of wave packets in a periodic potential of various shapes are considered. Attention is drawn to the problem of choosing new variables to correctly take into account the boundary conditions when solving the Schrödinger equations with different potentials. The possibility of taking into account the phase of the wave function in problems of the quantum theory of radiation is discussed.

В квантовой механике понятие фазы не играет существенной роли ввиду вероятностного характера квантовых эффектов [1]. Однако описание кооперативных явлений в мире микрочастиц [2], требует обращения к фазе волновой функции для описания, например, фазового перехода много-частичной системы в новое состояние. Рассмотрение условий, при которых, казалось бы, локальное взаимодействие квазичастиц приводит к коррелированному движению микрочастиц или квазичастиц в масштабах уже классических – так называемое макроскопическое когерентное состояние [3], непременно требует учитывать фазу макросостояния. В работе рассмотрены движение двух видов пакетов волн в различных потенциалах. Один из них представляет собой суперпозицию N волн, распределённых в интервале волновых векторов $\Delta k = N \cdot \delta k$. Волновая функция, описывающая такое

распределение удовлетворяет условию нормировки, и она может быть использована для расчёта коэффициентов прохождения и отражения при взаимодействии с потенциалами различной природы. Второй вид пакета представляет собой аналог гауссова пространственного распределения амплитуд поля по сечению лазерного пучка. Учёт линейной дисперсии в среде приводит к расплыванию пакета по мере движения в среде. Поскольку оба вида пакетов подчиняются условию нормировки как по пространству, так и по времени, эволюция таких пакетов может быть описана уравнением переноса параболического типа, например, уравнением Шредингера с учётом граничных и начальных условий. Эволюция волновых пакетов, была рассмотрена на примерах взаимодействия с потенциалами в виде микрорезонатора с плоскопараллельными отражающими стенками, прямоугольного барьера, и барьера с плавным изменением потенциала. Амплитуды плотности вероятности, собственные значения энергии и коэффициенты прохождения и отражения зависели от вида дисперсии фазы пакета. В случае учёта только линейного дисперсионного члена соотношение между коэффициентами прохождения (туннелирования) и отражения пакета внутри резонатора зависели от соотношения между размерами резонатора и пространственным распределением пакета внутри резонатора – симметрией пакета. Если при прохождении барьера, пакет оставался симметричным, наблюдался резонанс и амплитуда отражения возрастала с одновременным убыванием амплитуды туннелирования. Если пакет оказывался асимметричным, коэффициент прохождения возрастал с течением времени на длинноволновом пределе.

Эволюция пакета на одномерном периодическом потенциале в значительной степени зависела от двух факторов – размеров микрорезонатора в сравнении с эффективным размером пакета и условиями фазового согласования движения пакета во всех микрорезонаторах. При этом в случае учёта нелинейной дисперсии фазы время туннелирования сокращалось [4] и стремилось к нулю с одновременным возрастанием плотности вероятности нахождения пакета в резонаторе. Можно предположить, что могут быть созданы условия конденсации фотонов в периодической решётке микрорезонаторов.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. 3-е изд. М.: Наука, 1973.
2. Шифф Л. Квантовая механика. 2-е изд. М.: ИЛ, 1959.
3. Bose-Einstein condensation. Cambridge University Press, 2009.
4. Хачатрян А.Ж., Алексанян А.Г., Хоецян В.А., Алексанян Н.А. // Квантовая электроника. 2013. Т. 43. № 6. С. 574-581.

Д.Д. РУЖИЦКАЯ, К.Н. МИНЬКОВ

Российский квантовый центр, Сколково

МЕТОДИКА ИЗГОТОВЛЕНИЯ УЛЬТРАКОМПАКТНЫХ ВЫСОКОДОБОТНЫХ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ С МОДАМИ ТИПА ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Разработан метод изготовления оптических микрорезонаторов с модами типа шепчущей галереи из кристаллических материалов. Предложенный метод позволяет получить микрорезонаторы малого радиуса (порядка 30 мкм), обладающие высокой собственной добротностью (не ниже 10^7). Такие структуры могут быть использованы для решения актуальных задач нелинейной и квантовой оптики и фотоники.

D.D. RUZHITSKAYA, K.N. MIN'KOV

Russian Quantum Center, Skolkovo

FABRICATION METHOD OF ULTRACOMPACT HIGH-Q WHISPERING GALLERY MODE RESONATORS

A method for fabrication optical microresonators with whispering gallery modes based on crystalline materials is developed. The proposed method makes it possible to obtain microresonators of small radius (of the order of 30 μm) having high intrinsic quality factor (not less than 10^7) which can be used for actual problems of nonlinear and quantum optics and photonics.

Оптические микрорезонаторы с модами типа шепчущей галереи (МШГ) являются одним из ключевых элементов современной фотоники [1]. Ключевыми достоинствами МШГ являются малые размеры, высокие значения добротности, многомодовая структура, высокая концентрация поля в малом объёме, низкие пороги наблюдения нелинейных эффектов [1]. Одним из перспективных применений микрорезонаторов МШГ является генерация оптических частотных гребёнок (ОЧГ) [1 - 3]. Также они могут быть использованы для генерации неклассических состояний света. Для этого, однако, требуются высокодобротные микрорезонаторы достаточно малого радиуса.

Целью данной работы является разработка методики изготовления МШГ малого размера из кристаллических материалов, обеспечивающих

высокую добротность, и возможность контроля геометрии поверхности в процессе изготовления.

Предлагаемый процесс изготовления микрорезонаторов МШГ включает в себя следующие этапы.

1) Подготовка кристаллической заготовки толщиной 1 мм и диаметром 4 мм, включающая в себя её очистку и закрепление в держателе полировочного станка при помощи композитного клея.

2) После этого осуществляется химико-механическая полировка со снятием материала, при помощи контролируемого усилия, для придания МШГ необходимой формы и размеров.

3) Снятие сформированного резонатора с держателя при помощи нагрева до 400 °С и удаление остатков клея.

4) Финишная полировка поверхности микрорезонатора МШГ.

Предложенный метод позволяет получить микрорезонаторы на основе кристалла MgF_2 с радиусом порядка 30 мкм (рис. 1), контролировать радиус кривизны поверхности в процессе изготовления и обеспечивает добротность МШГ порядка $1 \cdot 10^7$. Кроме того, предложенный метод обеспечивает среднеквадратичную шероховатость поверхности МШГ 7 нм, что позволяет избежать дополнительных потерь излучения, возникающих из-за процессов рассеяния на поверхности. На рис. 2 представлены оптические спектры полученного образца в прямом и обратном направлении, линейном режиме при перестройке частоты лазера в прямом и обратном направлении с центральной длиной волны 1550 нм.

Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 21-72-00132).



Рис. 1. Изготовленный микрорезонатор из MgF_2 .



Рис. 2. Оптический спектр микрорезонатора из MgF_2 .

Список литературы

1. Braginsky V.B., Gorodetsky M.L., Ilchenko V.S. // Phys. Lett. A. 1989. V. 137. P. 393-397.
2. Kippenberg T.J., Holzwarth R., Diddams S.A. // Science. 2011. V. 332. P. 555-559.
3. Дмитриев Н.Ю. и др. // ЖЭТФ. 2022. Т. 162. Вып. 1 (7). С. 14-26.

Е.П. ПАНТЕЛЕЕВА, О.С. КАБАНОВА, Е.А. МЕЛЬНИКОВА
Белорусский государственный университет, Минск

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МОД В СИСТЕМЕ ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Разработана новая геометрия текстурированных электродов, позволяющая сформировать в тонкоплёночном слое нематического жидкого кристалла систему переключаемых оптических волноводов, реализующих управление траекторией распространения линейно-поляризованной световой волны. Метод пространственного управления траекторией лазерного излучения основан на эффекте линейного уширения жидкокристаллических волноводов под действием краевого электрического поля, что обеспечивает возможность регулирования оптической связи между волноводными каналами. Изготовлена жидкокристаллическая ячейка с системой независимых электрически индуцируемых оптических волноводов и продемонстрированы экспериментальные картины распространения S-моды излучения He-Ne лазера при различных амплитудах и схемах подачи управляющего напряжения.

Ye.P. PANTSIALEYEVA, O.S. KABANOVA, E.A. MELNIKOVA
Belarusian State University, Minsk

EXCITATION OF POLARIZATION MODES IN A SYSTEM OF OPTICALLY COUPLED LIQUID CRYSTAL WAVEGUIDES

A new geometry of patterned electrodes has been developed that makes it possible to form in a thin film layer of a nematic liquid crystal a system of switchable optical waveguides that realize control of the trajectory of linearly polarized light wave propagation. The method of spatial control of the laser radiation trajectory is based on the effect of linear broadening of liquid crystal waveguides under the fringe-field effect, which makes it possible to regulate optical coupling between the waveguide channels. A liquid-crystal cell with a system of independent electrically induced optical waveguides is fabricated and experimental patterns of S-mode propagation of He-Ne laser radiation at different amplitudes and control voltage schemes are demonstrated.

В области разработки и создания переключаемых жидкокристаллических элементов планарного типа, обеспечивающих управление пространственными, поляризационными и фазовыми характеристиками световых пучков на сегодняшний день ведутся активные исследования ввиду востребованности последних на рынке.

Уникальные свойства нематических жидких кристаллов (НЖК) позволяют создавать микроструктуры с высоким пространственным разрешением (порядка 1 мкм), характеризующиеся возможностью плавного управления оптическими характеристиками [1].

Новая геометрия электродов на основе токопроводящих систем «кольцо» и «стержень» обеспечивает возможность пространственного управления для определённой поляризационной моды лазерного излучения. При нулевом напряжении световой пучок He-Ne лазера испытывает дифракционное рассеяние в плоскости планарно-ориентированного ЖК-слоя (рис. 1а). При подаче управляющего напряжения выше порогового значения (переход Фредерикса [2]) на систему «стержень» формируется электрически индуцированный полосковый волновод для S-моды (рис. 1б) [3]. При одновременной подаче напряжения на электроды «кольцо» и «стержень» происходит пространственное перераспределение интенсивности лазерного излучения для определённой поляризационной моды (S-моды), что связано с уменьшением расстояния между волноводными каналами (рис. 1в).

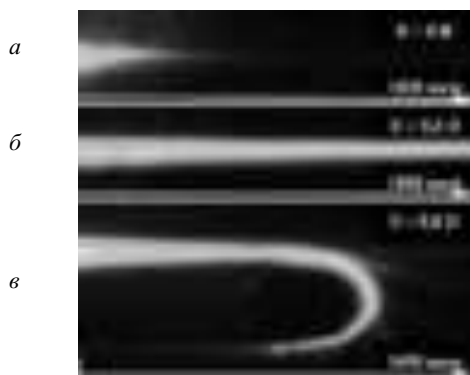


Рис. 1. Микрофотографии распространения S-моды в слое НЖК при нулевом напряжении (а), при подаче напряжения на электрод типа «стержень» (б), при подаче напряжения на электроды «кольцо» и «стержень» (в)

Список литературы

1. Tong X.C. Advanced materials for integrated optical waveguides. Springer Series in Advanced Microelectronics. Cham: Springer International Publishing, 2014. V. 46.
2. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978.
3. Melnikova E.A., Tolstik A.L., Rushnova I.I., Kabanova O.S., Muravsky A.A. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals // Applied Optics. 2016. V. 55. No. 23. P. 6491.

Ю.Р. ГАТАУЛЛИНА¹, Ю.В. МУХИН^{1,2}, Н.Д. КУНДИКОВА^{2,1}¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск²Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ НА ГРАНИЦАХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД

В настоящей работе получены условия сохранения вектора Джонса при отражении от границы анизотропной среды. Определены углы Брюстера и соответствующие им поляризации электромагнитных волн.

Yu.R. GATAULLINA¹, Yu.V. MUKHIN^{1,2}, N.D. KUNDIKOVA^{2,1}¹South Ural State University, Chelyabinsk²Institute of Electrophysics of Ural Branch of the RAS, Yekaterinburg

POLARIZATION EFFECTS AT THE INTERFACES WITH ANISOTROPIC MEDIA

In this paper, we have shown that the Jones vectors can be conserved at interfaces with anisotropic media. Brewster angles and polarizations of corresponding electromagnetic waves have also been determined.

Отражение электромагнитных волн от границы с анизотропной средой рассматривалось неоднократно (например, [1]). Тем не менее, детальные исследования поляризационных эффектов при отражении света от таких границ не проводились. Данная работа восполняет частично этот пробел. При отражении от границы двух изотропных сред поляризация волны никогда не сохраняется (за исключением двух тривиальных случаев s- или p-поляризованной падающей волны). Плоскость поляризации при отражении всегда прижимается ближе к границе раздела [2]. В случае анизотропных сред, в отражённой волне всегда присутствуют обе s- и p-поляризации, что как раз и допускает сохранение векторов Джонса. Чтобы определить, когда такое возможно, были получены граничные условия для плоских электромагнитных волн в случае одноосного кристалла с осью параллельной границе кристалла и изотропной среды.

Условия записаны для четырёх плоских волн в каждой среде с одинаковой проекцией волнового вектора на границу раздела. Плоскостью падения выбрана плоскость (OXZ), граница раздела – плоскость (OXY)

$$\begin{aligned} \cos \theta \cos \beta (E_p^+ + E_p^-) + \sin \beta (E_s^+ - E_s^-) &= \sin \gamma_e (D_e^+ + D_e^-) / \varepsilon_{\parallel}; \\ -\sin \beta \cos \theta (E_p^+ + E_p^-) + \cos \beta (E_s^+ - E_s^-) &= \cos \gamma_e \sin \alpha_e (D_e^+ + D_e^-) / \varepsilon_{\perp} + \cos \alpha_o (D_o^+ + D_o^-) / \varepsilon_{\perp}; \end{aligned}$$

$$-n \sin \beta (E_p^+ - E_p^-) + n \cos \theta \cos \beta (E_s^+ - E_s^-) = \sin \gamma_o (D_o^+ - D_o^-) / \sqrt{\varepsilon_{\perp}};$$

$$n \cos \beta (E_p^+ - E_p^-) + n \sin \beta \cos \theta (E_s^+ - E_s^-) = \cos \alpha_e (D_e^+ - D_e^-) / n_e - \cos \gamma_o \sin \alpha_o (D_o^+ - D_o^-) / \sqrt{\varepsilon_{\perp}};$$

где $n_e = \varepsilon_{\parallel} \left(1 - \frac{\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} \varepsilon_{\perp}} n^2 (\sin \theta)^2 (\cos \beta)^2 \right)$ – коэффициент преломления необыкновенной волны; n – коэффициент преломления изотропной среды; θ – угол падения; ε_{\parallel} и ε_{\perp} – параметры кристалла; β – угол между осью OX и оптической осью; $\cos \gamma_e = n \cos \beta \sin \theta / n_e$; $\cos \gamma_o = n \cos \beta \sin \theta / \sqrt{\varepsilon_{\perp}}$;

$$\cos \alpha_{e,o} = \sqrt{1 - (n \sin \theta / n_{e,o})^2} / \sin \gamma_{e,o} .$$

Амплитуды отражённой волны связаны с амплитудами падающей через линейный оператор, представленный матрицей в формулах ниже. Из соображений симметрии в отсутствии поглощения матрица является действительной и симметричной. Условие сохранения векторов Джонса дается характеристическим уравнением. Собственные значения $r_{1,2}$ и собственные вектора J приведены в формулах ниже.

$$\begin{pmatrix} E_p^- \\ E_s^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{pp} & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_p^+ \\ E_s^+ \end{pmatrix} \quad \det \begin{vmatrix} r_{pp} - r & r_{sp} \\ r_{ps} & r_{ss} - r \end{vmatrix} = 0$$

$$r_{1,2} = 0.5(r_{pp} + r_{ss} \pm w) \quad w = \sqrt{(r_{pp} - r_{ss})^2 + 4|r_{ps}|^2}$$

$$J = \begin{pmatrix} E_p^+ \\ E_s^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{0.5(1 + \frac{r_{pp} - r_{ss}}{w})} \\ \pm \frac{r_{ps}}{|r_{ps}|} \sqrt{0.5(1 \mp \frac{r_{pp} - r_{ss}}{w})} \end{pmatrix} .$$

На рис. 1 и 2 приведены годографы сохраняющихся векторов Джонса J для различных углов β (рис. 1) и брюстеровских поляризаций (рис. 2).



Рис. 1. Годограф векторов Джонса J для различных углов β

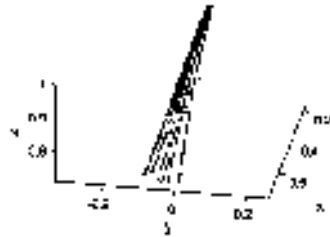


Рис. 2. Годограф брюстеровских поляризаций

Список литературы

1. Игнатович Ф. В., Игнатович В.К. // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 7. С. 759.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 8.М.: Книга, 1982.

А.И. ВАНИН¹, В.Г. СОЛОВЬЕВ^{1,2},
А.В. ЦВЕТКОВ¹, М.В. ЯНИКОВ¹

¹*Псковский государственный университет*

²*Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного,
Санкт-Петербург*

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ В МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ ОПАЛОВ

Представлен обзорный доклад, посвящённый циклу работ, связанных с возбуждением и распространением поверхностных плазмон-поляритонов в металлодиэлектрических структурах на основе опалов.

A.I. VANIN¹, V.G. SOLOVYEV^{1,2},
A.V. TSVETKOV¹, M.V. YANIKOV¹

¹*Pskov State University*

²*S.M. Budyonny Military Academy of Telecommunications, Saint-Petersburg*

SURFACE PLASMON-POLARITONS IN METAL-DIELECTRIC STRUCTURES BASED ON OPALS

A review report on the series of works related to the excitation and propagation of surface plasmon-polaritons in metal-dielectric structures based on opals is presented.

В основу разработки многих устройств современной фотоники положены плазмонно-фотонные гетерокристаллы (ПФГК) [1], которые представляют собой различные комбинации слоёв фотонных кристаллов (ФК), находящихся в контакте с тонкими металлическими плёнками. Использование ПФГК расширяет функциональные возможности систем по сравнению с обычными ФК за счёт переноса энергии вдоль границы металл-диэлектрик поверхностными плазмон-поляритонами (ППП) [2 - 4]. Использование в качестве ФК опалов, структура которых образована плотно упакованными сферическими глобулами с радиусами ~ 100 нм [5], позволяет достаточно просто обеспечить необходимое соответствие морфологии напылённого металлического покрытия особенностям поверхности исходного ФК с целью выполнения условия фазового синхронизма, необходимого для возбуждения ППП на границе раздела металл-диэлектрик. Это подтверждают сравнительные исследования

оптических свойств двух видов ПФГК [6 - 10], отличающихся последовательностью приготовления чередующихся металлических и диэлектрических слоёв и морфологией границы раздела металл-диэлектрик: ППП возбуждались лишь в системе с профилированным резонатором (рис. 1а), но не в системе с плоским резонатором (рис. 1б).

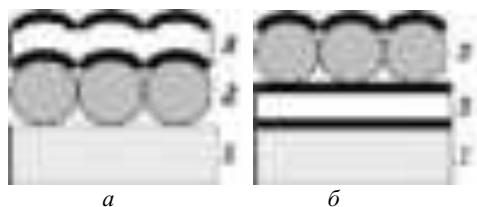


Рис. 1. ПФГК с различной последовательностью чередующихся металлических и диэлектрических слоёв и морфологией границы раздела металл-диэлектрик (а) и (б): 1 – стеклянная подложка, 2 – монослой опаловых глобул, 3 – резонатор Ag/SiO₂/Ag

Как показывает эксперимент, в результате возбуждения ППП может возникать как аномальное оптическое пропускание (ЕОТ), так и аномальное оптическое поглощение (ЕОА), причём в обоих случаях в спектрах отражения образцов наблюдаются соответствующие минимумы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 20-32-90003 и Германской службы академических обменов (DAAD).

Список литературы

1. Romanov S.G., Korovin A., Regensburger A., Peschel U. // *Advanced Materials*. 2011. V. 23. P. 2515-2533.
2. Поверхностные поляритоны (Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред) / под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985.
3. Maier S.A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. NY: Springer, 2007.
4. Климов В.В. *Наноплазмоника*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
5. Балакирев В.Г., Богомолов В.Н., Журавлёв В.В., Кумзеров Ю.А., Петрановский В.П., Романов С.Г., Самойлович Л.А. // *Кристаллография*. 1993. Т. 38. № 3. С. 111-120.
6. Ванин А.И., Лукин А.Е., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Ханин С.Д., Яников М.В. // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60. № 4. С. 770-773.
7. Ванин А.И., Кумзеров Ю.А., Романов С.Г., Соловьев В.Г., Ханин С.Д., Цветков А.В., Яников М.В. // *Оптика и спектроскопия*. 2020. Т. 128. № 12. С. 1919-1925.
8. Ханин С.Д., Ванин А.И., Кумзеров Ю.А., Соловьев В.Г., Цветков А.В., Яников М.В. // *Техника радиосвязи*. 2021. Т. 51 (4). С. 89-99.
9. Ханин С.Д., Ванин А.И., Кумзеров Ю.А., Соловьев В.Г., Цветков А.В., Яников М.В. // *Журнал технической физики*. 2022. Т. 92. № 2. С. 291-296.
10. Cvetkov A.V., Khanin S.D., Kumzerov Yu.A., Puchkov N.I., Solovyev V.G., Vanin A.I., Yanikov M.V. // *St. Petersburg Polytech. Univ. J. Phys. and Math*. 2022. V. 15. No. 3.1. P. 27-31.

А.А. РЫБАК^{1,2}, С.А. КУЗНЕЦОВ^{1,3}, Н.А. НИКОЛАЕВ²

¹*Новосибирский государственный университет*

²*Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск*

³*Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники – филиал Института физики полупроводников им. А.В. Рязанова СО РАН, Новосибирск*

ДИЗАЙН ТЕРАГЕРЦОВОГО ФИЛЬТРА С ШИРИНОЙ ПОЛОСЫ МЕНЕЕ 4 % НА БАЗЕ ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе представлены подход к моделированию и созданию терагерцового пропускающего полосового фильтра на основе эталона Фабри-Перо с шириной полосы менее 4 % с максимальной частотой в окрестности 806 ГГц и пропусканием не менее 70 % для детектирования линии углекислого газа.

A.A. RYBAK^{1,2}, S.A. KUZNETSOV^{1,3}, N.A. NIKOLAEV²

¹*Novosibirsk State University*

²*Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk*

³*Novosibirsk Branch TDIAM of Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS*

DESIGN OF A TERAHERTZ FILTER WITH LESS THAN 4 % BANDWIDTH BASED ON FREQUENCY SELECTIVE SURFACES

The paper presents the approach of simulation and creating of a terahertz bandpass filter based on a Fabry-Perot etalon with a bandwidth of less than 4 % with a maximum frequency in the vicinity of 806 GHz and transmission of at least 70 % for detecting a carbon dioxide line.

Терагерцовый узкополосный пропускающий фильтр на основе эталона Фабри-Перо (ФФП) с центральной частотой 806 ГГц ($\lambda = 372$ мкм), разрабатываемый для мониторинга узкой линии поглощения газа монооксида углерода (СО), представляет собой полипропиленовую плёнку (ПП) с нанесёнными с обеих сторон частотно-избирательными поверхностями (ЧИП) в форме квадратных прорезей в алюминиевом слое. Толщина ПП 120 мкм, толщина алюминиевых сеток 0.4 мкм. Расчёт и оптимизация структуры проводились в ANSYS® HFSS R19.

Первоначально произведены расчёты пропускания ФФП для отношения параметров a/g в диапазоне от 0.1 до 0.8, где a – ширина

металлических перемычек между ячейками, g – латеральный период структуры. При фиксированных отношениях a/g моделировались спектры пропускания ФФП в окрестности частоты 806 ГГц при значении $g = p \times \lambda$, где параметр p принимал значения от 0.1 до 0.5 с шагом 0.1. Чтобы определить оптимальные значения параметров g и a структуры с шириной полосы пропускания фильтра менее 4 % при максимальном возможном пропускании, в среде Python проведён анализ полученных спектров пропускания структур и построены карты значений амплитуды максимума пропускания T_{max} и ширины на полувысоте контура пропускания ($FWHM$) от параметров p и a/g . Далее на карте полуширины фильтра выделен контур, соответствующий заданному значению $FWHM = 4$ %, и перенесён на карту значений пропускания. Код программы нашёл пересечение этого контура с поверхностью и определил максимальное значение пропускания. Для заданных условий получены следующие параметры ФФП $a = 29,75$ мкм, $g = 108,63$ мкм при $FWHM = 3,8$ % и $T_{max} = 70$ %.

На следующем этапе были изготовлены образцы ФФП. На терагерцовом импульсном спектрометре проведено измерение данных структур при нормальном падении излучения и при повороте ФФП по горизонтали от 0 до 50 ° с шагом 5 °. Наиболее близкое значение к искомому (806 ГГц) получено при повороте на 20 ° – 801 ГГц. В результате исследования показано достаточно хорошее согласование между результатами моделирования и изготовленными ФФП.

Авторы благодарят ЦКП ВТАН НГУ и ЦКП ИАиЭ СО РАН «Спектроскопия и оптика» за проведение измерений на научном оборудовании. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проекты № FSUS-2020-0029 и № 121032400052-6.

В.В. КОСТРОМЫКИНА^{1,2}, Г.С. РОГОЖНИКОВ²

*¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),
Саров, Нижегородская обл.*

*²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

МОДЕЛЬ УСЛОВНО-СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

Предложена математическая модель, описывающая распространение терагерцового излучения через атмосферу с учётом естественных и искусственных диэлектрических преград. Модель верифицирована экспериментальными данными для миллиметрового крыла терагерцового диапазона частот.

V.V. KOSTROMYKINA^{1,2}, G.S. ROGOZHNIKOV²

¹Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

²All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

MODEL OF CONDITIONALLY FREE SPACE FOR TERAHERTZ-BAND REMOTE SENSING APPLICATIONS

A mathematical model describing propagation of terahertz band waves through the atmosphere concerning natural and artificial dielectric barriers has been proposed. The model is verified experimentally for the millimeter wing of the terahertz range.

Дистанционное зондирование объектов в терагерцовом диапазоне частот обычно связано с проблемами сильного ослабления [1] и рассеяния направленных пучков излучения как в чистой атмосфере, так и при взаимодействии с естественными диэлектрическими преградами (туман, осадки, деревья) и искусственными преградами [2]. Задача получения всей доступной информации о положении и форме изучаемого объекта решается с сохранением максимального качества и мощности зондирующего пучка, используя при восстановлении изображений интегральную спектральную характеристику условно-свободного пространства до объекта. Модель учитывает континуальное поглощение [3] в части в столкновительных реакций кислорода с молекулами воды (источник стороннего континуума) и столкновительных реакций молекул между собой (собственный континуум), поглощение на вращательных переходах составляющих атмосферу газов, рэлеевское рассеяние на

малых частицах [4], и рассеяние Ми [5] на крупных. Также учтено зеркально-диффузное отражение от сплошных преград и геометрическое рассеяние на разупорядоченных преградах. В рамках экспериментальной верификации с использованием стендов, использующих как непрерывное терагерцовое излучение (0.14, 0.3 и 0.5 ТГц), так и импульсное (~ 1 ТГц) исследованы механизмы поглощения простых и составных искусственных преград.

Список литературы

1. Sethy P.K., Mishra P.R., Behera S. An Introduction to terahertz technology, its history, properties and application // Proc. of International conference on computer and communications technologies. 2015.
2. Левин А.Д. Спектры малоуглового рассеяния света взвесями дисперсных частиц в поглощающих жидкостях // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 13.
3. Slocum D.M., Goyette T.M., et al. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects // Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer. 2013. No. 127. P. 49-63.
4. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986.
5. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971.

А.Э. АКМАЛОВ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ,
Ю.А. КУЗИЩИН, С.А. ЛАРИОНОВ, Е.М. МАКСИМОВ,
И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ, А.А. ПЛЕХАНОВ,
А.А. ЧИСТЯКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА, СОЗДАНЫЕ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

В настоящей работе изготовлена плосковыпуклая терагерцовая (ТГц) линза из ударопрочного полистирола (HIPS) методом наплавления (FDM) на 3D-принтере. Измерены характерные размеры дефектов, возникающих при печати. Методом терагерцового радиовидения со спектральным разрешением в одинаковых условиях измерены интенсивность излучения и ширина ТГц-пятна при фокусировке ТГц-пучка с помощью созданной ТГц-линзы и с помощью её коммерчески доступного аналога – ТГц-линзы из полиметилпентена (TPX). Проведено сравнение полученных результатов.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, K.I. KOZLOVSKII,
Yu.A. KUZISHCHIN, S.A. LARIONOV, I.L. MARTYNOV,
E.M. MAKSIMOV, A.A. PLEKHANOV, E.V. OSIPOV,
A.A. CHISTYAKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICAL ELEMENTS FOR THE THz RANGE, CREATED USING 3D PRINTING

In the present work, a plano-convex THz lens was fabricated from HIPS using the Fused Deposition Modeling (FDM) on a 3D printer. The characteristic dimensions of defects that appear during printing are measured. Using spectrally resolved terahertz radiovision under the same conditions, the radiation intensity and the width of the THz spot were measured when the THz beam was focused using the created THz lens and using its commercially available analogue, the THz lens made of TPX. The obtained results are compared.

Терагерцовое (ТГц) излучение относится к диапазону частот от 0,3 до 10 ТГц (длина волны 1 мм – 30 мкм). В ТГц-диапазоне находятся характеристические полосы поглощения многих сложных органических соединений. Это позволяет проводить идентификацию таких веществ по их ТГц-спектрам за счёт наличия в них спектральных особенностей [1].

При этом в указанном диапазоне прозрачны многие сухие диэлектрические материалы, такие как ткани, дерево, бумага, пластмассы и другие. Эти и другие особенности делают использование терагерцового излучения перспективным в медицине [2], фармацевтической промышленности [3], безопасности [4], неразрушающем контроле, связи нового поколения [5] и других отраслях. Активное использование ТГц-излучения связано с разработкой новых методов его генерации, модуляции и детектирования, и тем самым с разработкой оптических элементов, оптимизированных для ТГц-диапазона.

Технологии 3D-печати достигли в настоящее время возможности создания объектов с пространственным разрешением несколько десятков микрон. При этом высокая прозрачность материалов для ТГц-излучения [6], используемых в 3D-принтерах, делает их пригодными для производства печатных оптических элементов ТГц-диапазона.

В настоящей работе изготовлена плосковыпуклая ТГц-линза из ударопрочного полистирола (HIPS) методом наплавления (FDM) на 3D-принтере. Измерены характерные размеры дефектов, возникающих при печати. Методом терагерцового радиовидения со спектральным разрешением в одинаковых условиях измерены интенсивности излучения и ширина ТГц-пятна при фокусировке ТГц-пучка с помощью созданной ТГц-линзы и с помощью её коммерчески доступного аналога – ТГц-линзы из полиметилметакрилата (PMMA). Как показали результаты, в обоих случаях ширина ТГц-пятна оказалась одинаковой с точностью до ошибки эксперимента. При этом интенсивность излучения в случае использования изготовленной ТГц-линзы примерно в два раза уступает коммерческой. В работе также обсуждаются способы улучшения характеристик созданной линзы.

Таким образом, 3D-печать оказывается недорогим, универсальным и простым методом для изготовления оптических структур в ТГц-диапазоне.

Работа выполнена при поддержке в рамках программы «Приоритет-2030» (НИЯУ МИФИ).

Список литературы

1. Penkova N.A., Sharapov M.G., Penkov N.V. // International Journal of Molecular Sciences. 2021. V. 22. No. 20. P. 11089.
2. Siegel P.H. // IEEE transactions. 2004. V. 52. No. 10. P. 2438-2447.
3. Shen Y.-C. // International Journal of Pharmaceutics. 2011. V. 417. No. 1-2. P. 48-60.
4. Николаев Н.В. и др. // Вопросы безопасности. 2021. Т. 4. С. 39-49.
5. Federici J., Moeller L. // Journal of Applied Physics. 2010. V. 107. No. 11. P. 6.
6. Siemion A. // Sensors. 2020. V. 21. No. 1. P. 100.

И.Н. НИКОЛАЕВА^{1,2}, Г.С. РОГОЖНИКОВ²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал),
Саров, Нижегородская обл.*

²*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский
институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЗ- И КМОП-УСТРОЙСТВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Рассмотрены особенности регистрации электромагнитного излучения терагерцового (ТГц) диапазона частот матричными фотоприёмными устройствами на основе полупроводниковых структур с зарядовой связью и КМОП в интересах создания систем видения и дистанционного зондирования.

I.N. NIKOLAEVA^{1,2}, G.S. ROGOZHNIKOV²

¹*Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region*

²*All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region*

FEASIBILITY STUDY OF CCD AND CMOS DEVICES FOR REMOTE SENSING APPLICATIONS IN TERAHERTZ FREQUENCY RANGE

The peculiarities of detecting terahertz band radiation by means of matrix photoreceivers based on semiconductor charged-coupled and CMOS devices for remote sensing and vision applications have been discussed.

Особенностью терагерцового диапазона частот является возможность достижения более высокой направленности пучка по сравнению с радиоволнами, но с сохранением способности последних к проникновению сквозь большинство диэлектрических материалов, что делает терагерцовый (ТГц) радар улучшенной версией обыкновенного высокочастотного (ВЧ) радара [1]. Естественно, крайне высокое поглощение водяным паром субмиллиметрового терагерцового излучения вводит жесткие ограничения на практическую применимость такого вида локации, однако это решается путём точного попадания длины волны зондирующего источника в узкие «окна прозрачности» атмосферы [2].

Дистанционное зондирование объектов предполагает получение информации как об их местоположении, так и об особенностях их

строения (форме). Если с первой задачей легко могут справиться устройства с одноэлементным приёмным устройством, то для решения второй понадобятся многоэлементные приёмные устройства с достаточным пространственным разрешением. К сожалению, имеющиеся в распоряжении исследователей матричные ТГц-приёмники на базе пироэлектрических элементов являются достаточно инертными, крайне подвержены влиянию различного вида помех и имеют небольшое пространственное разрешение [3]. Выходом может стать использование стандартных ПЗС- и КМОП-матриц, работающих в режиме туннелирования фотоэлектронов в зону проводимости полупроводниковых структур, составляющих данные матрицы, за счёт эффекта Франца–Келдыша [4]. Впервые возможность детектирования изображений в ТГц-диапазоне обычными ПЗС- и КМОП-матрицами продемонстрирована в [5], что даёт возможность развивать данное направление как крайне перспективное с точки зрения затратности (существенно меньшая по сравнению с пироэлектрическими матрицами стоимость ПЗС и КМОП), скорости детектирования и пространственного разрешения.

В работе приведены оценки возможности регистрации изображений, полученных при помощи зондирования короткоимпульсным терагерцовым излучением объектов, находящихся за непрозрачной для наблюдателя преградой, обычными ПЗС- и КМОП-матрицами.

Список литературы

1. Gang Y., Yiming P. // EURASIP Journ. On Wireless Comm. 2014. V. 10.
2. Linden K., Neal W. // IEEE Computer Society Proc. 2005. V. 8.
3. Гибин И.С., Котляр П.Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2.
4. Сидоров А.И. Основы фотоники. СПб: ИТМО, 2014.
5. Shalaby M., Vicario C., Hauri C.P. // Opt.Lett. Vol. 42, No. 22 (2017)

В.В. ГАВРУШКО, О.Р. КАДРИЕВ, В.А. ЛАСТКИН¹
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
¹ОАО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ

Исследованы диаграммы направленности дифференциальных фотоприёмников, в стандартных корпусах. Обнаружило появление паразитных максимумов в длинноволновой области спектра, где чувствительность фотоприёмника должна отсутствовать. Появление сигналов связано с неравномерным затенением фоточувствительных площадок стенками корпуса. Для исключения паразитного эффекта рекомендуется использовать монтаж фотоприёмников в плоские корпуса. Возможно также применение для дифференциальных фотоприёмников матовых рассеивающих входных окон.

V.V. GAVRUSHKO, O.R. KADRIEV, V.A. LASTKIN¹
Yaroslav the Wise Novgorod State University, Veliky Novgorod
¹JCK «OKB-Planeta», Veliky Novgorod

FEATURES OF THE DIRECTION PATTERN OF DIFFERENTIAL PHOTORECEIVERS

The radiation patterns of differential photodetectors, in standard cases, have been studied. Found the appearance of parasitic maxima in the long-wavelength region of the spectrum, where the sensitivity of the photodetector should be absent. The appearance of signals is associated with uneven shading of the photosensitive areas by the walls of the case. To eliminate the parasitic effect, it is recommended to use the installation of photodetectors in flat cases. It is also possible to use frosted scattering input windows for differential photodetectors.

В дифференциальных фотоприёмниках используется метод вычитания сигналов рядом расположенных чувствительных площадок с различной спектральной характеристикой [1]. Это даёт возможность сформировать селективную спектральную чувствительность с использованием технологических операций только полупроводникового производства, без применения внешних фильтров. Для уменьшения влияния неоднородности освещения и физических характеристик структуры целесообразно сформировать два фоточувствительных канала в виде групп параллельно включённых фотоприёмников. Особенность топологии

дифференциальных фотоприёмников может сказываться на характере угловой зависимости чувствительности.

На рис. 1 приведены диаграммы направленности дифференциального фотоприёмника, помещённого в стандартный корпус типа КТ-2 для монохроматического излучения с различными длинами волн. Каждый канал содержал по 8 кремниевых фотодиодов, расположенных в шахматном порядке. Спектр чувствительности дифференциального канала был расположен в коротковолновой области, как это показано на рис. 2. При использовании монохроматического источника с длиной $\lambda_1 = 0.402$ мкм диаграмма имела обычный вид со значением плоского угла зрения по уровню $0.5 \text{ } 2\beta \approx 90^\circ$. Особенность в диаграмме направленности проявилась в длинноволновой области спектра, где наблюдалось появление ряда паразитных максимумов ($\lambda_2 = 0.625$ мкм). Чувствительность фотоприёмника в этом спектральном диапазоне должна совершенно отсутствовать. Появление сигналов можно связать с неравномерным затенением фоточувствительных площадок стенками углублённого корпуса и нарушением баланса каналов фотоприёмника. Паразитный эффект устранялся при монтаже фоточувствительной структуры в плоский корпус. Можно также рекомендовать применение для дифференциальных фотоприёмников матовых рассеивающих входных окон, исключающих появление тени от стенок корпуса.

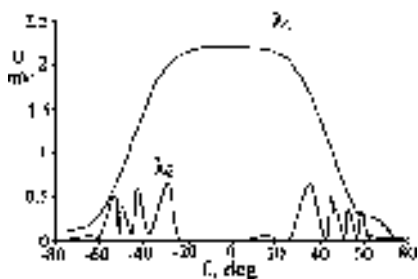


Рис. 1. Диаграмма направленности для излучения $\lambda_1 = 0.402$ мкм, $\lambda_2 = 0.625$ мкм

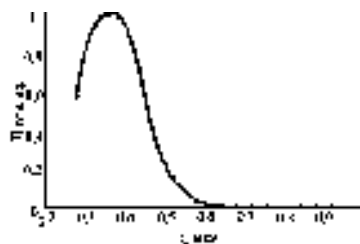


Рис. 2. Спектральная характеристика дифференциального фотоприёмника

Список литературы

1. Гаврушко В.В, Ионов А.С., Кадрив О.Р., Ласткин В.А. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 2. С. 310-311.

Д.С. КОНРАДИ, В.Г. СРЕДИН

*Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха***МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
ВНЕОСЕВОЙ ЗАСВЕТКИ ИК МАТРИЧНОГО
ФОТОПРИЁМНИКА**

Проведён анализ экспериментальных исследований низкоэнергетической внеосевой засветки ИК матричных фотоприёмников. На основе аналитической модели расчёта их параметров разработан подход к оценке искажений изображения, вносимого таким воздействием.

D.S. KONRADI, V.G. SREDIN

*Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter the Great, Balashikha***MODELING OF LOW-ENERGY OFF-AXIS ILLUMINATION
OF AN INFRARED MATRIX PHOTODETECTOR**

The results of experimental studies of low-energy off-axis illumination of an infrared matrix photodetectors are analyzed. Based on the analytical model for calculating their parameters, an approach to modeling the image distorted as a result of such an impact has been developed.

В результате проведения экспериментальных исследований [1, 2] установлена плотность вероятности возникновения номиналов напряжения на пикселях матричного фотоприёмника (МФП) при внеосевой засветке, описываемая следующей функцией:

$$G(u) = \frac{1}{\sigma_{LN} \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(u - U_{cp})^2}{2\sigma_{LN}^2} \right), \quad (1)$$

где $\sigma_{LN} = \sqrt{U_{cp}/2M}$ – среднеквадратическое отклонение номиналов напряжения; u – напряжение сигнала лазерной помехи на пикселе, В; U_{cp} – среднее значение напряжения на матрице, В; M – параметр, зависящий от угла падения излучения и его характеристик.

Для значений напряжения на чувствительных элементах (ЧЭ) МФП в диапазоне 0,15...0,35 В, среднего значения напряжения на матрице 0,2 В и СКО 0,032 В при учёте изменения параметра M в диапазоне 2...100 график приобретёт следующий вид, представленный на рис. 1.

При этом вероятность попадания значений напряжения пикселей в указанный диапазон составляет 0,942. Применяя аналитическую модель для расчёта параметров МФП [3], возможно получить приближённую модель изображения, формируемого при этом МФП, показанную на рис. 2. На нем тёмные квадраты соответствуют пикселям МФП, получившим минимальное облучение в результате внеосевой засветки, светлые – максимальное, причём минимальный уровень облучённости сопоставим с напряжением на выходе ЧЭ в 0,1 В, максимальный – 0,3 В. На рис. 3 показано приблизительное распределение напряжений по ЧЭ МФП при формировании внеосевой засветки.

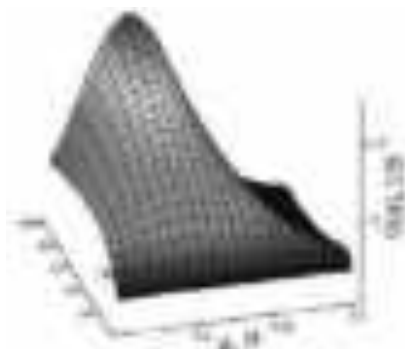


Рис. 1. График зависимости плотности вероятности возникновения номиналов напряжения на пикселях МФП в указанном диапазоне от значений напряжения и параметра M

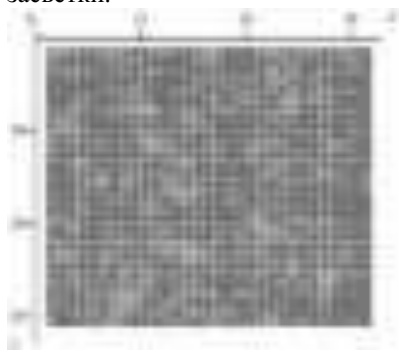


Рис. 2. Примерная картинка засветки пикселей МФП в результате внеосевой засветки

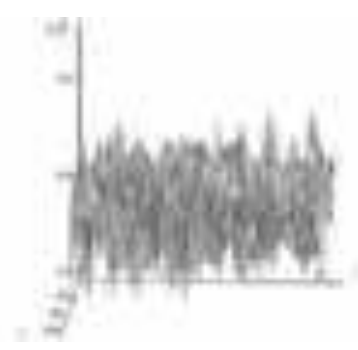


Рис. 3. График распределения напряжений по ЧЭ МФП

Список литературы

1. Павлов Н.И., Резунков Ю.А. // Квант. электроника. 2020. Т. 50. № 12. С. 1160-1166.
2. Павлов Н.И., Резунков Ю.А. // Оптический журнал. 2021. Т. 8. № 1. С. 37-43.
3. Патрашин А.И., Бурлаков И.Д., Корнеева М.Д., Шабаров В.В. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38-46.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ
Ульяновский государственный университет

ДИНАМИКА КВАЗИНЕПРЕРЫВНОЙ ВОЛНЫ В АКТИВНОМ НЕОДНОРОДНОМ СВЕТОВОДЕ

Исследуется динамика распространения модулированной волны в активном световоде с профилем зависимости дисперсии специально подобранным для обеспечения максимальных степеней сжатия генерируемых последовательностей ультракоротких импульсов.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV
Ulyanovsk State University

DYNAMICS OF A QUASI-CONTINUOUS WAVE IN AN ACTIVE INHOMOGENEOUS FIBER

The dynamics of propagation of a modulated wave in an active fiber with a dispersion dependence profile specially selected to provide the maximum compression ratios of the generated sequences of ultrashort pulses is studied.

В работе рассматривается методика усиления и временной компрессии частотно модулированных импульсов в активном световоде с профилем зависимости дисперсии от длины подобранным таким образом, чтобы обеспечивать максимальные степени сжатия импульсов с заданным начальным chirпом при заданном усилении световода.

Динамика временной огибающей волнового пакета описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [1, 2]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2(z)}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = gA, \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей (ДГС), R – параметр нелинейности, g – коэффициент усиления (потерь) в волокне.

При этом в работе выбиралась зависимость дисперсии вида:

$$d_2(z) = -|d_{20}| \exp \left[-\frac{\alpha_0 |d_{20}|}{g_0} (\exp(2g_0 z) - 1) + 2g_0 z \right]. \quad (2)$$

На рис. 1 приведены: динамика ДГС (линия 1) и пиковой мощности (линия 2), для световода длиной $L = 1.5z_0$, где z_0 – точка максимума модуля дисперсии. В работе рассматривалась модулированная волна вида:

$$A(0, \tau) = \sqrt{P_0} [1 + 0.01 \cos(\Omega_{\text{mod}} \tau)]. \quad (3)$$

Приведённые зависимости получены путём численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров импульса: начальная длительность $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощность $P_0 = 0.01$ Вт, и световода: ДГС $d_2 = -10^{-27}$ с²/м, параметр нелинейности $R = 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹, в световоде, состоящем из сегментов $l_1 = 28$ м и $l_2 = 142$ м, обладающих усилением: $g_1 = 0.1$ м⁻¹, $g_2 = 0.015$ м⁻¹.

Видно, что распространяясь по первому отрезку волокна, модулированная волна адиабатически усиливается, при этом изменяется форма и увеличивается глубина модуляции. Мощность сигнала имеет линейный рост с длиной волокна, достигая на выходе первого отрезка волокна ~ 1 Вт. Во втором сегменте волокна происходит преобразование волны в периодическую последовательность импульсов.

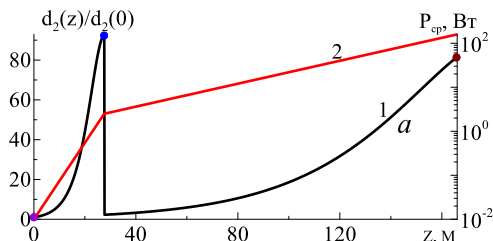


Рис. 1. Динамика ДГС (1) и средней мощности (2) в световоде, состоящем из двух сегментов с различным усилением и ДГС, определяемом по формуле (2)

Работа выполнена при поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-22-00412.

Список литературы

1. Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Sementsov D.I., Fotiadi A.A., Popov S.V. // Optics Communications. 2018. V. 426. P. 333-340.
2. Abramov A.S., Zolotovskii I.O., Lapin V.A., Mironov P.P., Yavtushenko M.S., Svetukhin V.V., Fotiadi A.A. // Photonics. 2022. V. 9 (3). P. 160.

Д.В. КАЛЯЗИНА, С.В. ВАРЖЕЛЬ, А.А. ДМИТРИЕВ,
А.С. ВАРЖЕЛЬ, В.А. КУЛИКОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ОТЖИГА НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЁТКИ

Настоящая работа посвящена исследованию изменений спектральных характеристик волоконных брэгговских решёток (ВБР) при их температурном отжиге. Приведены результаты влияния воздействия отжига при различной температуре на ВБР с разными первоначальными характеристиками.

D.V. KALIAZINA, S.V. VARZHEL, A.A. DMITRIEV,
A.S. VARZHEL, V.A. KULIKOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

RESEARCH OF TEMPERATURE ANNEALING EFFECTS ON THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A FIBER BRAGG GRATING

This work is devoted to the study of changes in the spectral characteristics of fiber Bragg gratings during its temperature annealing. Gratings with known reflectance/transmission coefficients were investigated under the influence of various temperatures.

Известно, что волоконная брэгговская решётка (ВБР) представляет собой участок оптического волокна (чаще всего одномодового) с индуцированной в сердцевине периодической структурой показателя преломления. Такая структура обладает особыми спектральными характеристиками, позволяющими применять ВБР в различных устройствах волоконной оптики. Одним из самых важных свойств волоконной брэгговской решётки является ширина полосы спектра отражения оптического излучения, а также коэффициент этого отражения. Повлиять на эти параметры можно при записи ВБР, задав ей определённые пространственные характеристики.

Для многих сфер применения ВБР приоритетным параметром является узкая полоса отражения $\Delta\lambda$. На данный момент установлено, что воздействие высоких температур на ВБР способно сузить $\Delta\lambda$. Известно,

что чем выше температура, тем сильнее влияние на спектральные характеристики ВБР.

В данной работе представлены результаты отжига ВБР, индуцированных в стандартном телекоммуникационном оптическом волокне SMF-28 (G.657.A2) с разными изначальными спектральными характеристиками. Отжиг проводился при различных температурах, длительность каждого эксперимента составляла 120 мин., фиксирование характеристик осуществлялось каждые 5 мин.

В ходе экспериментов, наибольшее воздействие наблюдается в первые минуты отжига. Так, например, за первые 30 мин. полная ширина на полувысоте спектрального отклика ВБР с изначальным коэффициентом отражения 99 % сузилась с 0,215 до 0,191 нм, с 0,212 до 0,163 нм и с 0,215 до 0,145 нм при воздействии температур 100, 150 и 200 °С соответственно (рис. 1).

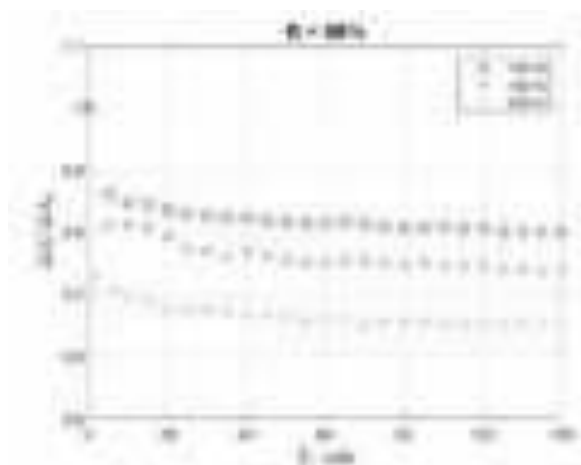


Рис. 1. Зависимость относительной ширины на полувысоте от времени отжига

Благодаря отжигу на протяжении 120 мин. при температуре 100 °С удалось добиться уменьшения полной ширины на полувысоте полосы отражения решётки до 0,185 нм, до 0,158 нм при 150 °С и 0,140 нм при 200 °С. Стоит заметить, что эти параметры сохранились после охлаждения решётки.

О.Э. БАБКИН^{1,2}, Л.А. БАБКИНА², В.В. ИЛЬИНА¹

¹*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения*

²*ООО «S@H Technology», Санкт-Петербург*

ТОЛСТОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

Представлены результаты исследований в области получения защитных одно- и двухслойных покрытий, применяемых в производстве оптического волокна. Рассмотрены варианты универсализации составов фотополимеризующихся композиций с учётом замены поставщиков сырья и разумного импортозамещения. Представлены составы разработанных композиций для получения толстослойных покрытий кварцевых световодов технологией «мокрый по мокрому» с последующим LED-отверждением на промышленной установке.

O.E. BABKIN^{1,2}, L.A. BABKINA², V.V. IL'INA¹

¹*Saint-Petersburg State University of Film and Television*

²*S@H Technology Ltd, Saint-Petersburg*

THICK-LAYER COATINGS OF OPTICAL CABLE

The report presents the results of research in the field of obtaining protective one- and two-layer coatings used in the production of optical fibers. The options for universalization of the compositions of photopolymerizable compositions are considered, taking into account the replacement of raw material suppliers and reasonable import substitution. The compositions of the developed compositions for the production of thick-layer coatings of quartz light guides using the «wet on wet» technology with subsequent LED curing on an industrial plant are presented.

Санкт-Петербургская фирма «S@H Technology» проводит собственные научные разработки в области получения функциональных лакокрасочных материалов, в том числе для создания покрытий методом фотополимеризации (UV- и LED-отверждения), а также производит высококачественные UV- и LED-полимеризующиеся материалы и является партнером ряда промышленных предприятий, использующих их в производственном цикле.

Ранее представленные на широкое обсуждение исследования [1] о составах фотополимеризующихся композиций показали свою практическую значимость, а возможность варьирования рецептур композиций [2] оказались востребованными на современном этапе резкого дефицита импортного сырья, связанного с санкциями.

Технологическое обоснование составов рецептур и ранее разработанные составы для покрытий световодов оптических кабелей [3, 4] предполагали использование сырья в основном западно-европейских производителей, сейчас закрывших свой рынок для российских предприятий. Поэтому был оперативно организован анализ рынка сырья из дружественных стран и проведены исследования на доступных сейчас ингредиентах для ранее составленных рецептур с их корректировкой и универсализацией. В итоге, были разработаны и промышленно апробированы рецептуры композиций на основе фенолэтоксикарилата (13 %) с трёхфункциональным активным разбавителем с температурой стеклования 59 °С (11 %) и добавкой двухфункциональных акрилатов: эпоксиакрилата и уретанакрилата в соотношении 5:1. В качестве растекателя в композиции введён полисилоксановый полимер (0,8 %). Фотоиницирующая смесь под технологию LED-отверждения составлена из 2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфин оксида (3 %) и 1-гидроксициклогексилфенилкетона (1,2 %).

На рис. 1 приведена микрофотография среза оптического волокна с покрытием из разработанных рецептур, полученная на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA3 SBH в ИЦ СПбГТИ (ТУ).



Рис. 1. Микрофотография среза оптического волокна, полученного по технологии двухслойного покрытия «мокрый по мокрому» с последующим LED-отверждением

Список литературы

1. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В. Технология ультрафиолетового отверждения для производства оптических кабелей // IX Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. научн. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 465-466.
2. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В. Принципы составления рецептур, определяющих свойства фотополимерных покрытий и изделий // Известия СПбГТИ (ТУ). 2019. № 48 (74). С. 63-67.
3. Babkin O.E., Il'ina V.V., Babkina L.A., Sirotinina M.V. UV-Cured coatings for functional protection // Russian journal of Applied Chemistry. 2016. V. 89. No. 1. P. 114-119.
4. Babkin O.E., Vlasov M.Yu., Aikasheva O.S., Il'ina V.V., Babkina L.A. Photopolymer coatings for the optic fiber systems JSC // Theor. Found. Chem. Eng. 2022. V. 56. No. 4. P. 560-565.

Г.А. ПЧЕЛКИН^{1,2}, А.В. ХОХЛОВ¹, Е.В. ТЕР-НЕРСЕСЯНЦ¹,
А.В. БУРДИН^{1,2}, В.В. ДЕМИДОВ¹, А.С. МАТРОСОВА¹

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОМОДОВЫХ КИРАЛЬНЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ШЕСТЬЮ СЕРДЦЕВИНАМИ

Обоснована необходимость использования малоимодовых микроструктурированных оптических волокон. Рассмотрена шестисердцевинная структура построения микроструктурированных волокон. Доработана схема для контроля модового состава и дефектов оптических волокон. Изготовлены и представлены структуры микроструктурированных волокон для изучения оптических вихревых полей. Представлены результаты исследований волокна с шестью сердцевинами и зависимости от параметров технологического цикла его производства.

G.A. PCHELKIN^{1,2}, A.V. KHOKHLOV¹, E.V. TER-NERSESYANTS¹,
A.V. BOURDINE^{1,2}, V.V. DEMIDOV¹, A.S. MATROSOVA¹

¹*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

²*The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

INVESTIGATION OF THE CHARACTERISTICS OF LOW-MODE CHIRAL MICROSTRUCTURED OPTICAL FIBER WITH SIX CORE

The necessity of using low-mode microstructured optical fibers is substantiated. Six core structure of microstructured fibers construction is considered. The scheme for monitoring the mode composition and defects of optical fibers has been improved. The structures of microstructured fibers for the study of optical vortex fields are made and presented. The results of studies of a fiber with six cores and the dependence on the parameters of the technological cycle of its production are presented.

В настоящее время скрученные микроструктурированные оптические волокна (МОВ) рассматриваются как новые волоконно-оптические элементы с большим потенциалом для различных приложений, как в волоконно-оптических датчиках / сенсорных сетях, так и в телекоммуникациях. Такой же метод индукции хиральности при

вытягивании МОВ был впервые представлен в 2004 году и обеспечил значительное снижение PMD. В настоящее время известны работы (как теоретические, так и содержащие практическую реализацию), в которых скрученные МОВ декларируются как поддерживающие поляризацию волоконно-оптические устройства с генерирующей оптической активностью, волоконно-оптические зонды для измерения деформации и скручивания, а также тока и магнитного поля, спектральных и модовых фильтров, оптических пинцетов и телекоммуникаций на основе оптического углового орбитального момента.

В данной работе представлен изготовленный МОВ из скрученного кварца со специальной геометрией сердцевин [1], легированной GeO_2 , с шестью сердцевинами, внешним диаметром 125 мкм работающим в маломодовом режиме и индуцированной хиральности с закруткой 1000 оборотов в минуту (рис. 1). Для детектирования оптических вихрей и наблюдения объединения оптических полей в киральных микроструктурированных волокнах с шестью сердцевинами, выполненными из высоколегированного GeO_2 кварцевого стекла, был доработан новый стенд. Ранее используемые оптические схемы обладали большими габаритами, потерями при прохождении излучения и повышенными требованиями к стабилизации температуры. Полученные результаты показали, что использование разработанного нами стенда позволяет быстрее и точнее определять модовый состав и вихревые поля в различных микроструктурированных волокнах.

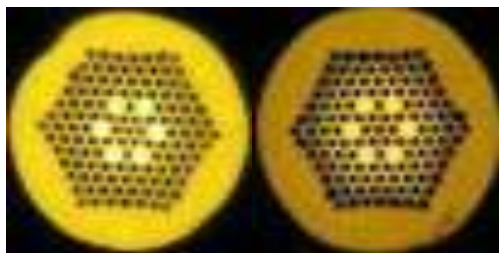


Рис. 1. Изображения поперечных сечений изготовленных маломодовых микроструктурированных ОВ с шестью сердцевинами различной киральности

Список литературы

1. Bourdine A.V., Barashkin A.Yu., Burdin V.A., Dashkov M.V., Demidov V.V., Dukelskii K.V., Evtushenko A.S., Ismail Y., Khokhlov A.V., Kuznetsov A.A., Matrosova A.S., Morozov O.G., Pchelkin G.A., Petruccione F., Sakhabutdinov A.Zh., Singh G., Ter-Nersesyants E.V., Tiwari M., Zaitseva E.S., Janyani V., Yin J. Twisted silica microstructured optical fiber with equiangular spiral six-ray geometry // *Fibers*. 2021. V. 9 (5). P. 27.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА БРИЛЛЮЭНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ «DRAKA»

В работе представлены результаты экспериментальных исследований спектра рассеяния Манделштама–Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне G.652 разновидности «DRAKA».

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

RESEARCHES OF THE BRILLOUIN SCATTER SPECTRUM OF THE «DRAKA» OPTICAL FIBER

The work presents the results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scattering spectrum in the singlemode optical fiber G.652 of the «DRAKA» variety.

Классификация разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ) различных производителей в проложенных оптических кабелях (ОК) является актуальной задачей [1, 2].

Для изучения параметров бриллюэновского рассеяния (РМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС – f_B) в ОВ необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы для всех анализируемых разновидностей обычных одномодовых ОВ [2], и для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ для ОВ при соединении ОВ G.652 + «DRAKA» + ULTRA + LBL. Различие характеристик СРМБ позволяет определить различить разновидности ОВ, используемые на различных участках. В правом нижнем углу – профиль спектра РМБ (СРМБ) и величина БЧС (f_B).

На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1]. Объединение отрезков нескольких разновидностей ОВ в общий световод существенно увеличивает скорость получения итоговых результатов измерений [2].

По полученным общим BOTDR-рефлектограммам можно наблюдать изменения СРМБ и изучать профили СРМБ различных типов ОБ. Величина БЧС у ОБ «DRAKA» – 10.754 ГГц.

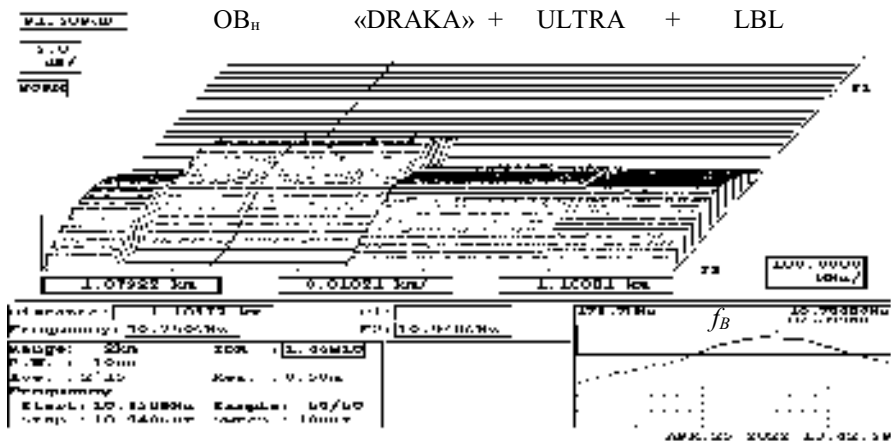


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ при соединении
ОБ G.652 + «DRAKA» + ULTRA + LBL

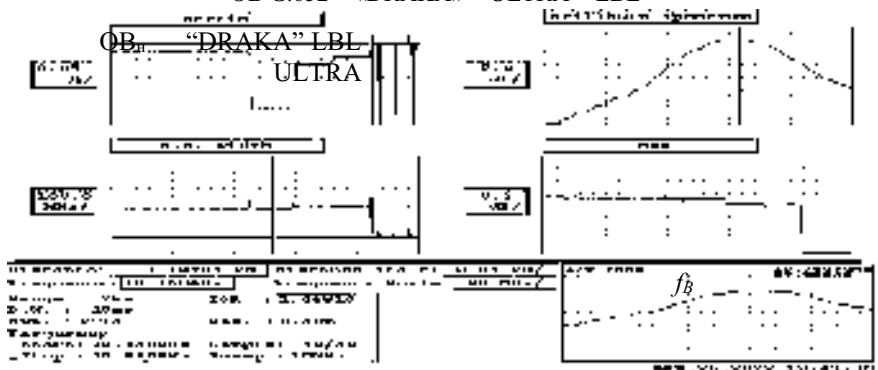


Рис. 2. Мультирефлектограмма при соединении
ОБ G.652 + «DRAKA» + ULTRA + LBL

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в некоторых разновидностях оптических волокон // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Т. 10.
2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

А.С. ЛУЦЕНКО, Ю.А. КОНИН¹

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ ВСТРЕЧНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ЭНЕРГИЕЙ ВЫШЕ ПОРОГОВОЙ

Приведено описание взаимодействия коротких оптических импульсов, движущихся навстречу друг другу, в среде с нелинейным показателем поглощения. Определены условия и причины формирования внутриволоконных слаборассеивающих структур. Полученные результаты могут быть использованы при разработке чувствительных элементов на основе оптических волокон без нарушения эксплуатационных свойств.

A.S. LUTSENKO, Yu.A. KONIN¹

*Perm National Research Polytechnic University
¹ITMO University, Saint-Petersburg*

INTERACTION OF COUNTER PULSES WITH ENERGY ABOVE THE THRESHOLD IN OPTICAL FIBER

A description of the interaction of short optical pulses moving toward each other in a medium with a nonlinear absorption index is given. The conditions and reasons for the formation of intra-fiber weakly scattering structures are determined. The obtained results can be used in the development of sensitive elements based on optical fibers without violating the operational properties.

Высокий уровень мощности и малая эффективная область модового пятна приводят к нелинейному отклику волноводной среды на распространяемое излучение. Некоторые эффекты, возникающие вследствие взаимодействия высокой энергии с материалом, оставляют перманентные изменения [1, 2], которые можно использовать во благо.

Если одна или несколько электромагнитных волн, с энергией, когда электрическое поле фактически начинает возмущать электронные облака вокруг ядер, распространяются в материале, может образовываться плазма, сильно поглощающая излучение и нагревающая локальную область, которая образуется в результате ионизации исходно нейтральной среды, увеличении концентрации и энергии свободных электронов, развитии электронной лавины.

В случае, когда гауссов импульс, где интенсивность в центральной части больше, чем по краям, разделён на две составляющие, движущиеся навстречу друг к другу, в месте их пересечения коэффициент поглощения перестает быть линейным и возникает нелинейное поглощение с быстрым нагревом локальной области материала. Нагрев приводит к диффузии материала сердцевинки в оболочку, за счёт чего изменяется показатель преломления – появляется центр рассеяния. Управляя временем взаимодействия импульсов, можно получать различные геометрии рассеивающих структур и их характеристики. Есть предпосылки, что эффективность образования данных структур определяется не длительностью и спектром импульса, а только энергией [3].

На рис. 1 продемонстрировано взаимодействие двух встречных импульсов. Пространственная область взаимодействия импульсов с веществом не превышает область их перекрытия, чем, собственно, и определяются, размеры создаваемого дефекта.

В среде Comsol произведена визуализация расчёта модели рассеяния элементом в одномодовом волокне, созданного вследствие взаимодействия импульсов, суммарная энергия которых превысила пороговую (рис. 2). Крайне малое время взаимодействия импульсов не позволяет нарушить структурную целостность материала и приводит лишь к изменению показателя преломления.

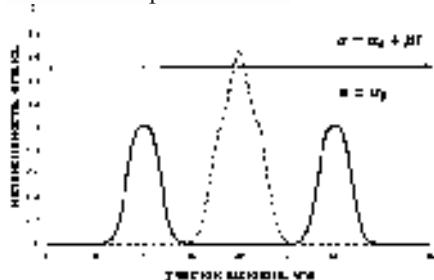


Рис. 1. Взаимодействие встречных импульсов

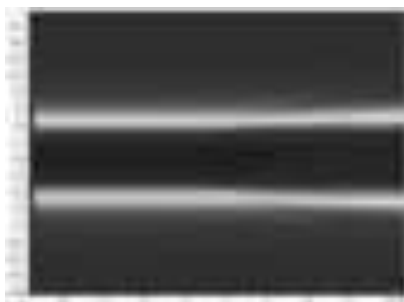


Рис. 2. Модель идеального слаборассеивающего элемента

Список литературы

1. Vartapetov S.K., Ganin D.V., et al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45 (8). P. 725.
2. Беспрозванных В.Г., Первадчук В.П. Нелинейные эффекты в волоконной оптике. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011.
3. Skobelev S., Mironov V., Litvak A.G., Balakin A. Self-focusing of few optical cycle pulses // AIP Conference Proceedings. 2006. V. 827.

А.И. ЗАЙЦЕВ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, А.А. ФРОЛОВ, М.О. ФЕДЮК,
О.Н. ЕГОРОВА¹, С.Г. ЖУРАВЛЕВ¹, С.Л. СЕМЁНОВ¹

*Московский технический университет связи и информатики
¹Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова ИОФ РАН, Москва*

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ ОТ МОДУЛИРОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КВАНТОВЫЙ КАНАЛ СВЯЗИ В МНОГОСЕРДЦЕВИННОМ ВОЛОКНЕ

Представлены результаты исследований влияния модулированного лазерного излучения, распространяющегося в одной из сердцевин многосердцевинного волокна длиной 3 м на характеристики квантового и классического канала связи, реализованных в соседних сердцевинах. Установлено, что модулированное лазерное излучение при средней мощности до 1.5 мВт не оказывает заметного влияния на классические каналы связи, но при мощности лазерного канала свыше 0.5 мВт в квантовом канале фиксируется существенный рост квантовых ошибок, если в блоках квантового распределения ключей не осуществлять спектральной селекции каналов связи.

A.I. ZAITSEV, S.Yu. KAZANTSEV, A.A. FROLOV, O.A. FEDYUK,
O.N. EGOROVA¹, S.G. ZHURAVLEV¹, S.L. SEMJONOV¹

*Moscow Technical University of Communications and Informatics, Russia
¹Dianov Fiber Optic Research Center of the GPI RAS, Moscow*

EFFECT OF CROSSTALK FROM MODULATED LASER RADIATION ON A QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL IN A MULTI-CORE FIBER

The results of studies of the effect of modulated laser radiation propagating in one of the cores of a 3 m long multicore fiber on the characteristics of quantum and classical communication channels implemented in neighboring cores are presented. It has been established that modulated laser radiation at an average power of up to 1.5 mW does not have a noticeable effect on classical communication channels, but at a laser channel power of more than 0.5 mW, a significant increase in quantum errors is recorded in the quantum channel if spectral selection is not carried out in quantum key distribution blocks.

Применение многосердцевинного волокна (МСВ) позволяет, практически, кратно числу сердцевин увеличить скорость передачи данных по одному волокну [1]. Для реализации технологии КРК требуется

два канала связи, один классический или открытый, а другой квантовый, в котором информация передается одиночными фотонами [2]. Цель работы – исследование влияние перекрестных помех от модулированного лазерного излучения, заведённого в одну сердцевину МСВ на параметры классических и квантовых каналов, реализованных в других сердцевинах.

Эксперименты проводились на МСВ, предоставленном ПАО ПНППК (<https://pnppk.ru/>), переходники к односердцевинным коннекторам были изготовлены аналогично [3]. Излучение лазерного диода Nolatech DFB – 1550 нм 14BF-10 мВт, модулировалось прямоугольными импульсами с частотой 20 кГц с помощью генератора R&S DMB100A, для регистрации перекрестных оптических помех использовался фотоприёмник Thorlabs DXM30AF с полосой пропускания 30 ГГц, сигнал с которого мог подаваться на анализатор спектра R&S FSV3030. Средняя мощность излучения лазера на входе и выходе МСВ контролировалась с помощью фотоприёмника – Thorlabs S156C. Влияние модулированного лазерного излучения на величину QBER, регистрировалось на НОК EMQOS 1.0. На рис. 1а показана внешний вид кросса, в котором располагалось МСВ с выходными и входными коннекторами, а на рис. 1б осциллограмма перекрестных помех с фотоприёмника, подключённого к сердцевине, находящейся рядом с той, по которой распространялось модулированное лазерное излучение средней мощностью 1 мВт. В экспериментах было установлено, что чувствительности фотоприёмника было недостаточно для обнаружения перекрестных помех, помехи фиксировались лишь по увеличению QBER на установке КРК, в которой установлен детектор одиночных фотонов. Построены зависимости QBER от мощности лазера.



Рис. 1. Фотография кросса с МСВ (а); осциллограмма перекрестных помех с анализатора спектра (б)

Список литературы

1. Lin R., et al. // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 78836-78846.
2. Миронов Ю.Б. и др. //Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22-33.
3. Egorova O.N., Astapovich M.S., Semjonov S.L., Belkin M.E. // Quantum Electronics. 2016. V. 46. No. 12. P. 1134-1138.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ
ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовых оптических волокнах различных видов и производителей.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER CHARACTERISTICS
OF THE VARIOUS TYPES OF OPTICAL FIBER**

The results of experimental researches of the Mandelstam–Brillouin backscatter characteristics of the various types of optical fiber are presented in this work.

В настоящее время существует разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ) различных производителей [1, 2]. Разновидности ОВ одного вида будут иметь схожие характеристики. Актуальной является задача классификация разновидностей ОВ в проложенных оптических кабелях (ОК) [2, 3].

Для изучения характеристик бриллюэновского рассеяния (РМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) в ОВ необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы для всех анализируемых разновидностей ОВ [1 - 3], и для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

Объединение отрезков нескольких разновидностей ОВ в общий световод существенно увеличивает скорость получения итоговых результатов измерений, а также делает более заметными отличия различных секций (ОВ) световода. По полученным общим BOTDR-рефлектограммам можно наблюдать изменения СРМБ и изучать профили СРМБ различных типов ОВ. В результате были установлены начальные значения БЧС (f_{B0}) для всех исследованных разновидностей ОВ [1 - 3].

В табл. 1 сведены значения $f_{\text{во}}$ для проанализированных в этой работе типов ОВ (у них добавлена в обозначение буква «S»), а также некоторых других ранее проанализированных ОВ [1 - 3].

Таблица 1

Разновидность ОВ	Значения $f_{\text{во}}$, ГГц	Рекомендуемые значения $f_{\text{во}}$, ГГц
G.652	10.82 ... 10.86	10.84
G.652 Ultra	10.82...10.83	10.82
G.652 (G.652 LBL)	10.84	10.84
G.652-200 мкм	10.76 ... 10.78	10.77
G.652 S(1235)	10.806 ... 10.810	10.81
G.652 S(1305)	10.778 ... 10.820	10.78
G.653 (DSF)	10.47 ... 10.49	10.47
G.654E S	11.021 ... 10.025	11.02
G.655 (NZDSF)	10.61 ... 10.64	10.63
G.655-2	10.47 ... 10.48	10.48
G.655 (LEAF)	10.66 ... 10.67	10.66
G.657	10.77 ... 10.80	10.79
G.657 S	10.694	10.69
“DRAKA” S	10.754	10.75
DCF	9.77	9.77
EDF	10.69 ... 10.71	10.70
EDF-2	10.95	10.95
ECDF	10.38 ... 10.39	10.38
«Panda»	10.40 ... 10.43	10.42
«Panda PS-887»	10.55 ... 10.56	10.55

Таким образом, при наличии бриллюэновских рефлектограмм по величине БЧС, характеристикам частотного профиля СРМБ можно классифицировать разновидности ОВ, а также выявлять производителя ОВ. Автор благодарит сотрудников ЗАО «Москабель–Фуджикура» и АО «Оптиковолоконные Системы» (г. Саранск) за проявленный интерес к настоящей работе, за предоставленные для исследования образцы ОВ и содействие в проведении экспериментов с BOTDR.

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Изучение особенностей рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Телекоммуникации. 2019. № 5. С. 21-29.
2. Богачков И.В., Горлов Н.И. Исследование влияния структуры оптических волокон на спектральные характеристики рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 4. С. 98-105.
3. Богачков И.В., Трухина А.И. Исследования влияния структуры оптических волокон на характеристики рассеяния Мандельштама–Бриллюэна // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10, № 3. С. 15-19.

А.А. ГАРКУШИН^{1,2}, Е.В. НИФОНТОВА^{1,2}, Р.П. РАСУЛЕВ¹,
В.В. КРИШТОП^{1,2,3}, М.А. ГАРИПОВА^{1,2}, П.В. ЗУЕВА^{1,2},
И.Л. ВОЛЬХИН^{1,3}, С.А. СТОРОЖЕВ^{1,2}, Ю.Н. ХИЖНЯКОВ²

¹Пермская научно-производственная приборостроительная компания

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

³Пермский государственный национальный исследовательский университет

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОТИПА СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ЧЕРЕЗ ОПТОВОЛОКНО МОЩНОСТЬЮ ДО 5 Вт

Собран и исследован прототип системы электроснабжения через оптическое волокно (PoF) с мощностью на стороне потребителя не менее 5 Вт. Максимальный КПД оптической части системы составил 11,5 %. Показано, что для оптимальной работы устройства требуется нелинейный регулятор мощности лазерного диода.

A.A. GARKUSHIN^{1,2}, E.V. NIFONTOVA^{1,2}, R.P. RASULEV¹,
V.V. KRISHTOP^{1,2,3}, M.A. GARIPOVA^{1,2}, P.V. ZUEVA^{1,2},
I.L. VOLKHIN^{1,3}, S.A. STOROZHEV^{1,2}, Yu.N. KHIZHNYAKOV²

¹Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm

²Perm National Research Polytechnic University

³Perm State University

CHARACTERISTICS OF THE POWER-OVER-FIBER SYSTEM PROTOTYPE UP TO 5 W

A prototype of a power supply system over optical fiber (PoF) with a power on the consumer side of at least 5 W was assembled and studied. The maximum efficiency of the optical part of the system was 11.5 %. It is shown, that a nonlinear laser diode power controller is required for optimal operation of the device.

Технология передачи энергии через оптический световод для энергоснабжения электронных устройств называется Power-over-Fiber (PoF). Передача энергии через оптический световод целесообразна, если требуется, например, обеспечить высокий уровень электромагнитной совместимости, молниезащита, полная гальваническая развязка. Технологии PoF может быть полезной в разных сферах. На рис. 1 представлен макет такой системы, включающий лазерный диод (ЛД) 1, световод 2, фотоэлектрический преобразователь (ФЭП) 3 и блок управляющей электроники 4.



Рис. 1. Прототип системы PoF

По полученным данным в ходе эксперимента выяснилось, что использование неоптимальных выходной и входной оптической мощности ЛД (LDM11-975-70-CW) и ФЭП (УСН-Н6424-25-FC-A), соответственно, приводит к значительному уменьшению (5,6% вместо 11,5%) эффективности всей системы PoF. Для создания оптимальной системы были исследованы отдельные оптоэлектронные компоненты системы, найдены зависимости КПД ЛД и ФЭП от оптической мощности, температуры, нагрузочного сопротивления и определены точки максимальной мощности

Для достижения максимальных значений КПД необходимо измерять в режиме реального времени динамическое сопротивление потребителя, температуру ЛД и ФЭП и другие параметры. Совокупность измеренных характеристик, с учётом заранее определённых параметров оптоэлектронных компонентов, позволяет рассчитать и выставить оптимальную оптическую мощность ЛД в каждый момент времени. В проведённом исследовании все параметры изменялись вручную.

В дальнейшем такой алгоритм работы можно реализовать с помощью различных систем автоматического управления, использующих различные регуляторы в управляющем контуре с обратной связью. Наиболее перспективным направлением является использование нелинейных регуляторов на базе нечёткой логики [2]. Такой тип регуляторов достаточно прост в настройке, позволяет учитывать несколько параметров одновременно при формировании управляющего воздействия, обладает гибкой структурой и, в тоже время, не требует больших аппаратных затрат и программных ресурсов.

Список литературы

1. Гаркушин А.А. и др. // Фотон-экспресс. 2021. № 6. С. 42-43.
2. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ
ВОЛОКНЕ СО СМЕЩЁННОЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.654 (со смещённой длиной волны отсечки).

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN
SCATTER CHARACTERISTICS OF THE OPTICAL FIBER
WITH A SHIFTED CUT-OFF WAVELENGTH**

The results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of the optical fiber G.654 (with shifted cut-off wavelength) are presented in this work.

В настоящее время существует большое количество типов одномодовых (ОВ), которые разработаны для решения определённых задач и используются для изготовления оптических кабелей (ОК) [1, 2]. Классификация разновидностей ОВ (схожих по свойствам, но различных производителей) в проложенных ОК, является актуальной задачей.

С целью изучения параметров характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) (спектра РМБ – СРМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) в одномодовых оптических волокнах необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы для всех анализируемых разновидностей ОВ [2]. Для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение СРМБ для ОВ G.654E (рекомендация МСЭ–Т G.654E – ОВ со смещённой отсечкой (длиной волны отсечки (λ_{cut}), равной 1530 нм), которое предназначено для высокоскоростных наземных оптических сетей большой протяжённости). Это ОВ имеет достаточно низкие потери на макроизгибе, улучшенные характеристики хроматической дисперсии для диапазона длин волн

1530 - 1625 нм, диапазон номинального диаметра модового поля [1]. На рис. 2 для ОВ G.654E показана соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1]. Величина БЧС для G.654E при нормальных условиях равна 11.02 ГГц.

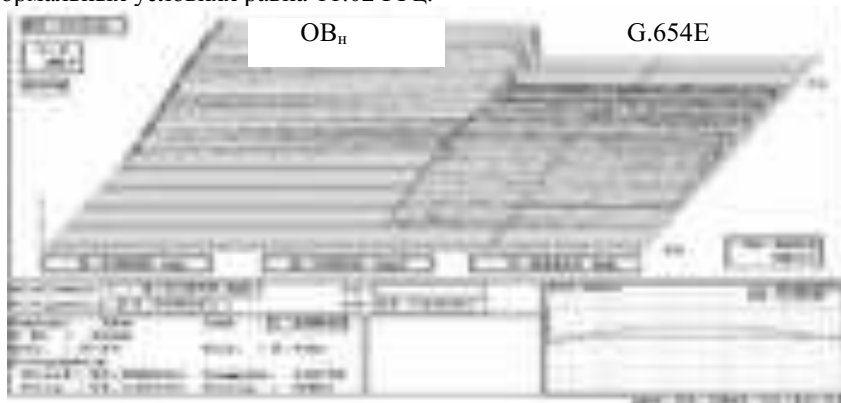


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ G.654E, ОВ_н – нормализующая катушка – G.652, в правом нижнем углу – профиль СРМБ и величина БЧС для G.654E

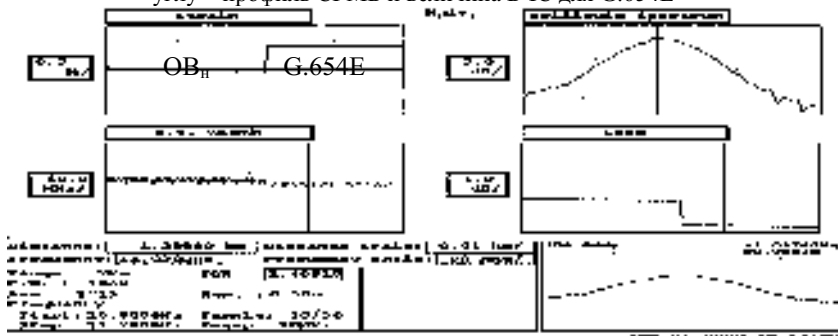


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ G.654E

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в некоторых разновидностях оптических волокон // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Т. 10.
2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА–
БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ G.657**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.657 с повышенной устойчивостью к изгибам, то есть не чувствительное к потерям на изгибе.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**EXPERIMENTAL RESEARCHES
OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER
CHARACTERISTICS OF THE G.657 OPTICAL FIBER**

The results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of the optical fiber G.657 with increased resistance to bends are presented in the paper.

В настоящее время классификация разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ), схожих по свойствам, но различных производителей, в проложенных оптических кабелях (ОК) является актуальной задачей [1, 2]. Для изучения параметров бриллюэновского рассеяния (РМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) в ОВ необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы для всех анализируемых разновидностей ОВ [2], и для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение спектра РМБ – (СРМБ) для ОВ G.657 (МСЭ–Т G.657) с повышенной устойчивостью к изгибам (то есть ОВ не чувствительное к потерям на изгибе). На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1]. На рис. 2 для ОВ G.657 приведена

соответствующая мультирефлектограмма. Величина БЧС для G.657 при нормальных условиях равна 10.69 ГГц.

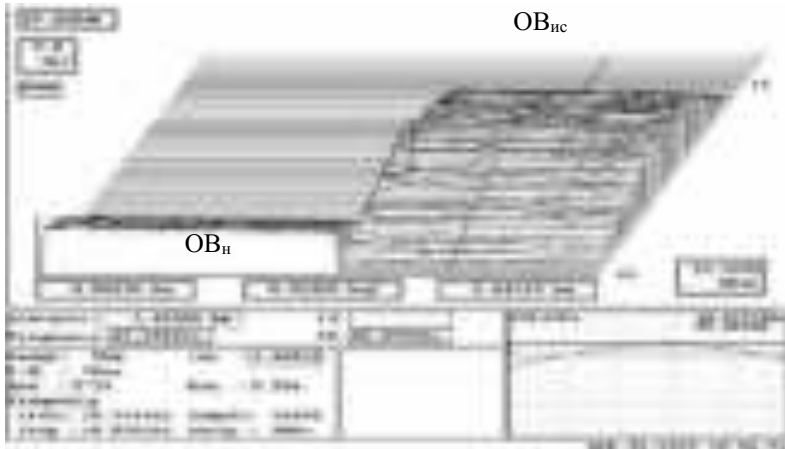


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ G.657, в правом нижнем углу – профиль СРМБ и величина БЧС

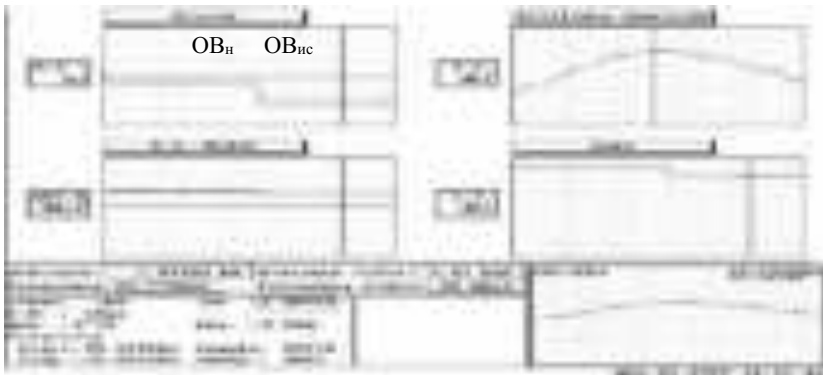


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ G.657

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в некоторых разновидностях оптических волокон // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Т. 10.
2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ
ВОЛОКНЕ G.652 С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ 1235 нм**

В работе представлены результаты исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в одномодовом оптическом волокне G.652 с длиной волны отсечки 1235 нм.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–BRILLOUIN SCATTER
CHARACTERISTICS OF THE G.652 OPTICAL FIBER
WITH CUT-OFF WAVELENGTH OF 1235 nm**

The results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of the optical fiber G.652 with cut-off wavelength of 1235 nm are presented in the paper.

Актуальной задачей в настоящее время является классификация разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ), весьма схожих по свойствам, но различных производителей, в проложенных оптических кабелях (ОК) [1, 2]. Для оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) и изучения параметров характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) в ОВ следует для всех анализируемых разновидностей ОВ получить бриллюэновские рефлектограммы [2].

Для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603». На рис. 1 представлено пространственное распределение спектра РМБ – (СРМБ) для ОВ G.652 (МСЭ–Т G.652), но с длиной волны отсечки, равной 1235 нм. На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет зависимости по всей длине световода натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1]. Величина БЧС для G.652 (при длине отсечки 1235 нм) при нормальных условиях равна 10.81 ГГц.

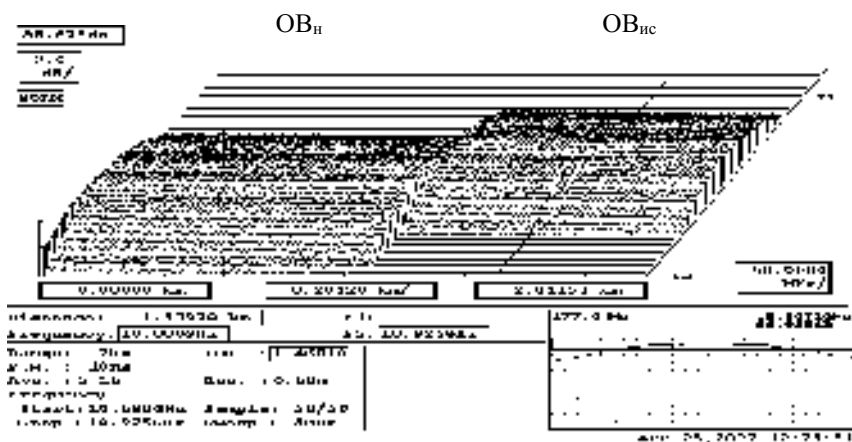


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ G.652 (1235 нм), OB_n – нормализующая катушка – G.652, в правом нижнем углу – профиль СРМБ и величина БЧС

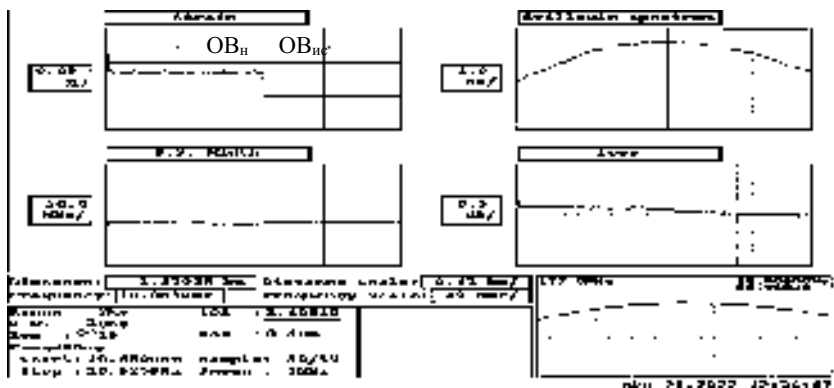


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ G.652 (1235 нм)

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в некоторых разновидностях оптических волокон // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Т. 10.
2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЙНИЯ
МАНДЕЛЬШТАМА–БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКОМ
ВОЛОКНЕ G.652 С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ОТСЕЧКИ 1305 нм**

В работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна в оптическом волокне G.652 с длиной волны отсечки 1305 нм.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE MANDELSTAM–
BRILLOUIN SCATTER CHARACTERISTICS OF THE G.652
OPTICAL FIBER WITH CUT-OFF WAVELENGTH OF 1305 nm**

The results of experimental testing of the Mandelstam–Brillouin scatter characteristics of the optical fiber G.652 with cut-off wavelength of 1305 nm are presented in this work.

В данное время актуальной задачей является классификация разновидностей одномодовых оптических волокон (ОВ), схожих по свойствам, но различных производителей, в проложенных оптических кабелях (ОК) [1, 2]. С целью изучения параметров рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ) и оценки величины бриллюэновского частотного сдвига (БЧС) в ОВ необходимо получить бриллюэновские рефлектограммы для всех анализируемых разновидностей ОВ [2], и для этого были проведены экспериментальные исследования с BOTDR (бриллюэновским импульсным рефлектометром) «Ando AQ 8603».

На рис. 1 представлено пространственное распределение спектра РМБ – (СРМБ) для ОВ G.652 (МСЭ–Т G.652), но с длиной волны отсечки, равной 1350 нм. На рис. 2 представлена соответствующая мультирефлектограмма, которая представляет пространственные зависимости (по всей длине световода) натяжения (Strain), ширины СРМБ (B.S.W), профиля СРМБ) и уровня обратно отражённого сигнала (Loss), с указанием характерных участков и положения БЧС [1]. Величина БЧС для G.652 при нормальных условиях равна 10.78 ГГц.

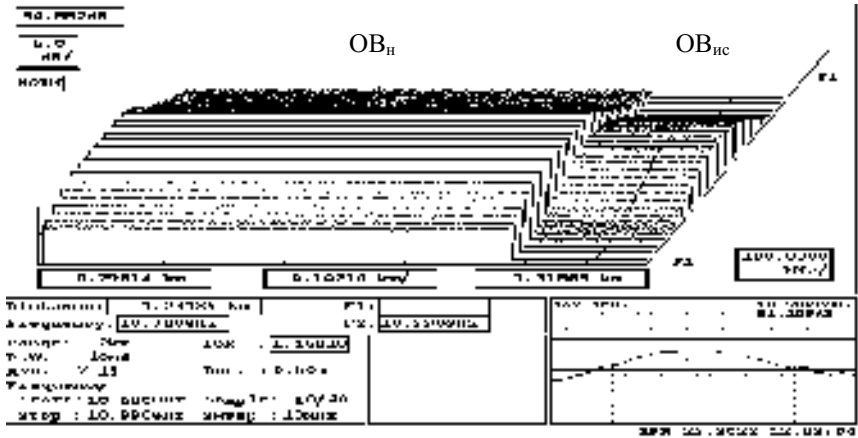


Рис. 1. Пространственное распределение СРМБ для ОВ G.652 (1305 нм), ОВ_н – нормализующая катушка – G.652, в правом нижнем углу – профиль СРМБ и величина БС

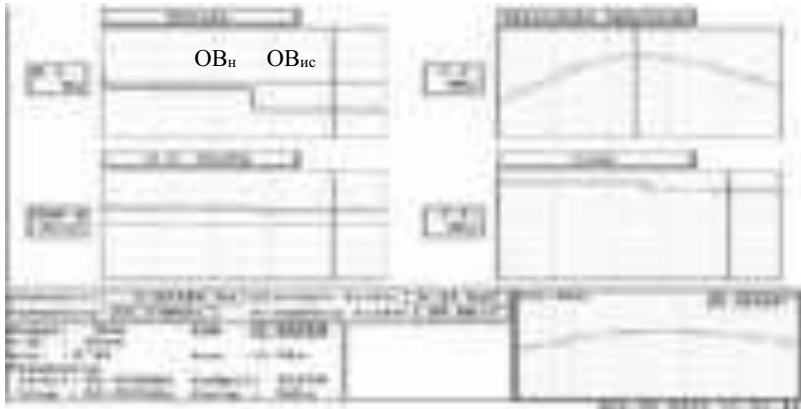


Рис. 2. Мультирефлектограмма для ОВ G.652 (1305 нм)

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Экспериментальные исследования характеристик рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в некоторых разновидностях оптических волокон // Динамика систем, механизмов и машин, 2022. Т. 10.
2. Богачков И.В. Определение профиля спектра рассеяния Манделъштама–Бриллюэна в оптических волокнах различных видов // Вестник СибГУТИ. 2021. Вып. 2. С. 88-99.

В.В. САВИН, К.А. КОННОВ, Д.А. КОННОВ, А.И. КОЗЛОВА,
В.А. КУЛИКОВА, А.Л. ВОЛОШИНА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРИВОЛОКОННОГО ОТВЕТВИТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Представленная работа посвящена разработке и исследованию внутриволоконного устройства для контроля мощности проходящего излучения с заданным коэффициентом ответвления.

V.V. SAVIN, K.A. KONNOV, D.A. KONNOV, A.I. KOZLOVA,
V.A. KULIKOVA, A.L. VOLOSHINA
ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF INTRA-FIBER TAP MONITOR FOR RADIATION POWER CONTROL

The present work is devoted to the development and research of an intra-fiber tap power monitor of transmitted radiation with a given tapping factor.

Традиционный метод контроля мощности сигналов в волоконно-оптических линиях связи заключается в применении классических разветвителей для отвода части излучения от основного волокна [1]. Изготовление устройств такого типа требует наличия дорогостоящего оборудования и сопровождается большим количеством этапов сборки. Применение таких компонентов приводит к увеличению габаритных размеров конечных систем и внесению дополнительных оптических потерь. Альтернативные методы контроля проходящей мощности излучения предполагают внесение дополнительных конструктивных элементов в оптическую схему, что также усложняют структуру конечного прибора.

Целью работы является разработка и изготовление внутриволоконного ответвителя для контроля мощности проходящего излучения. На рис. 1 представлена схема разрабатываемого устройства. В оптическом волокне формируется постоянный по форме изгиб путём изменения формы световода под действием электрической дуги сварочного аппарата. На требуемом расстоянии от изгиба с помощью оптического клея

устанавливается фотодетектор. Такая схема позволяет отводить часть излучения на измерительный прибор за счёт частичного вывода излучения из сердцевины в оболочку оптического волокна. Изменение геометрических параметров изгиба позволяет контролировать коэффициент ответвления.

Для оценки влияния длины и угла изгиба на величину отводимой мощности излучения проведено моделирование в ПО COMSOL Multiphysics (модуль Геометрическая оптика, Трассировка лучей) [2]. В рамках моделирования использовалось стандартное одномодовое оптическое волокно SMF-28 и оптический клей с показателем преломления 1.45, длина волны излучения – 1550 нм. Для определения оптимальных геометрических параметров изгиба волокна и места вывода излучения из оболочки проведён расчёт при длине изгиба от 50 до 125 мкм с шагом 25 мкм при угле изгиба от 6 до 15 °.

Разработан метод формирования постоянного изгиба волокна с применением электрической дуги аппарата для сварки оптических волокон. Проведены эксперименты для определения оптимального режима работы сварочного аппарата с целью контроля коэффициента вывода излучения (рис. 2).

Изготовлен макетный образец внутриволоконного ответвителя с коэффициентом ответвления 5 % с вносимыми потерями менее 0,4 дБ.

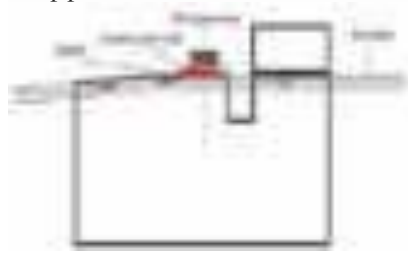


Рис. 1. Схема волоконно-оптического устройства для контроля мощности излучения на основе его частичного внутриволоконного вывода

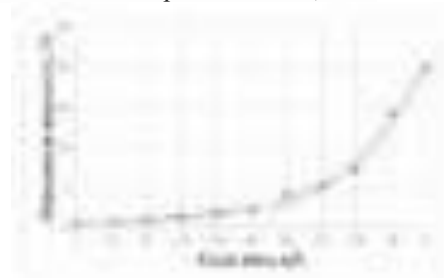


Рис. 2. График зависимости отведённой мощности от силы тока, подаваемого на электроды

Список литературы

1. Practical fiber optics / ed. by D. Bailey, E. Wright. Oxford: Newnes, 2003.
2. Modeling software for ray tracing in optically large systems. Electronic resource.

М.М. ВЕКШИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ 3D-РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МЕЖМОДОВОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

Проведена разработка 3D волоконно-оптических разветвителей, использующих эффект межмодовой интерференции. Разветвители используют серийно выпускаемые волоконные многомодовые световоды с квадратной формой сердцевины.

M.M. VEKSHIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF FIBER-OPTIC 3D COUPLERS BASED ON MULTIMODE INTERFERENCE

The design of 3D multimode interference fiber-optic splitters has been made. Splitters are based on commercially available multimode fibers with square core.

Цель настоящей работы – разработка одномодовых разветвителей оптического излучения, использующих в основе своего функционирования интерференцию волноводных мод (multimode interference – MMI) в многомодовом волоконном световоде с квадратной формой сердцевины в её поперечном сечении.

Волоконно-оптический 3D MMI-разветвитель состоит из входного одномодового волоконного световода, пристыкованном соосно к многомодовому световоду с квадратной формой сердцевины и строго определённой длины, в котором происходит разделение мощности оптического излучения на части. Волоконные разветвители этого типа позволяют получить на своём выходе набор $N \times N$ световых пучков гауссовой формы поперечного сечения из единого входного светового пучка той же формы.

Волоконные световоды с квадратной формой сердцевины в настоящее время производятся серийно для устройств фотоники и лазерной техники. Как один из вариантов использования таких разветвителей, к выходному торцу многомодового световода может быть подсоединён световод с набором одномодовых сердцевин в одной оболочке.

На рис. 1а и 1b показана схема разветвителя. Геометрические параметры разветвителя: ширина и высота многомодового канала – W_{MM} и H_{MM} , D – диаметр сердцевины входного одномодового световода.

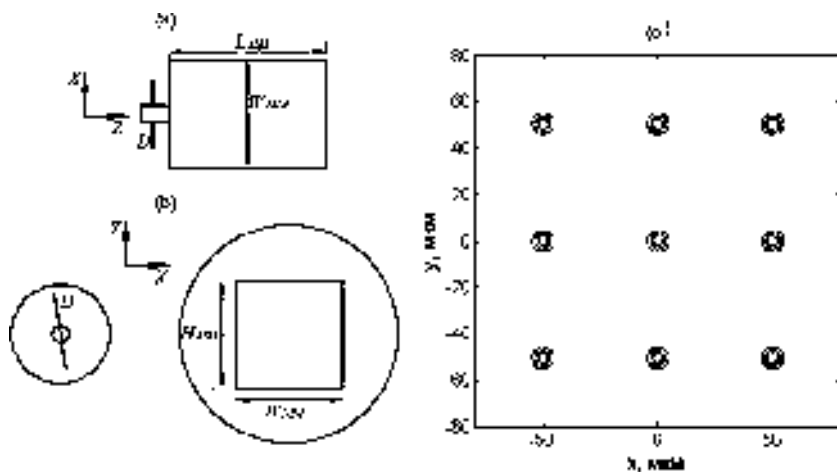


Рис. 1. Схема волоконно-оптического 3D MMI-разветвителя оптического излучения (а) и (b); распределение напряжённости электрического поля на выходном торце волоконно-оптического разветвителя 3×3 (с)

Расчётные параметры многомодового волоконного световода с квадратной формой сердцевины: ширина и высота канала $W_{MM} = 150$ мкм и $H_{MM} = 150$ мкм, показатель преломления сердцевины и оболочки световода $n_{co}^{MM} = 1,457$ и $n_{cl}^{MM} = 1,404$, длина волны 1550 нм. В качестве источника входного излучения использовалась мода световода SMF-28 ($D = 8,2$ мкм). Для построения разветвителя 3×3 расчётная длина световода L_{MM} составляет 7200 мкм. Отображение 3×3 периодически повторяется, поэтому можно использовать световод и с большей длиной. На рис. 1с показано распределение напряжённости электрического поля ТЕ-поляризованного излучения на выходном торце многомодового световода. Расчёт проведён методом распространяющегося пучка.

Таким образом, проведена разработка 3D-разветвителей оптического излучения на основе эффекта межмодовой интерференции в волоконном многомодовом световоде с квадратной формой сердцевины.

А.И. КОЗЛОВА, Я.Д. МООР, С.В. ВАРЖЕЛЬ, А.Л. ВОЛОШИНА,
В.В. САВИН, В.А. КОМИСАРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЕСА АВТОТРАНСПОРТА**

Представленная работа посвящена разработке и исследованию волоконно-оптической системы с использованием решёток Брэгга для измерения нагрузки на колеса и оси транспортных средств в движении.

A.I. KOZLOVA, Ya.D. MOOR, S.V. VARZHEL, A.L. VOLOSHINA,
V.V. SAVIN, V.A. KOMISAROV
ITMO University, Saint-Petersburg

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A FIBER-OPTIC
SYSTEM FOR DYNAMIC MEASUREMENT
OF VEHICLE WEIGHT**

The presented work is devoted to the development and research of a fiber-optic system using fiber Bragg gratings to measure the load on the wheels and axles of vehicles in motion.

Система взвешивания в движении предназначена для непрерывного и автоматического контроля полной массы автомобиля. Ввиду конструктивных особенностей такие системы чувствительны к влиянию многих факторов, которые могут негативно сказываться на измерении массогабаритных параметров [1]. Например, тензометрические датчики, используемые в системах взвешивания, обладают невысокой механической прочностью и температурной зависимостью, для компенсации которой требуется использовать дополнительные датчики температуры.

Целью работы является разработка и изготовление чувствительного элемента волоконно-оптической системы для динамического измерения веса автотранспорта. На рис. 1 представлена принципиальная схема волоконно-оптической системы. В качестве источника излучения использовался широкополосный источник лазерного излучения Thorlabs S5FC1005S. Для записи волоконных решёток Брэгга (ВБР) в стандартном

оптическом волокне SMF-28 применялась эксимерная лазерная система МОРА CL-7550 (OptoSystems, Россия) и интерферометр Тальбота [2].

Использование специальной структуры чувствительного элемента, состоящей из n-ВБР и не менее одной чирпированной ВБР (ЧВБР) приводит к отсутствию необходимости температурной компенсации за счёт близкого расположения ВБР и ЧВБР в подложке. Спектральный отклик отражения ВБР и ЧВБР одинаково смещается при влиянии температуры, а воздействие силы транспортного средства оказывается только на чувствительный элемент, расположенный в силиконовом слое подложки, при этом центральная длина волны брэгговского резонанса сдвигается в длинноволновую область и попадает на спектральную полосу отражения ЧВБР (рис. 2). С помощью двухканального измерителя мощности регистрируется изменение амплитуды отражённого сигнала, которое является искомой измеряемой величиной, выражающей степень приложенной силы воздействия исследуемого объекта, находящегося в движении.

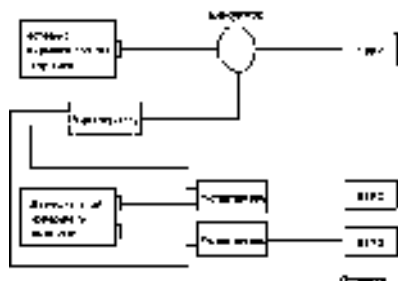


Рис. 1. Принципиальная схема волоконно-оптической системы

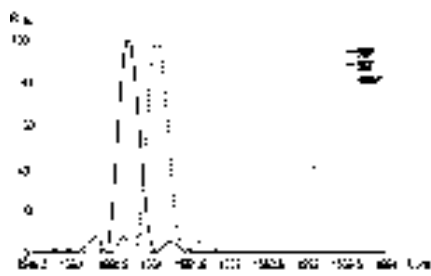


Рис. 2. Спектры отражения решёток в составе чувствительного элемента: жирная линия – ВБР без влияния силы давления на подложку; пунктирная линия – ВБР под влиянием силы давления на подложку; тонкая линия – ЧВБР

Список литературы

1. Burnos P., et al. High accuracy weigh-in-motion systems for direct enforcement //Sensors. 2021. V. 21. No. 23. P. 8046.
2. Грибаев А.И. Создание метода и оптического комплекса для записи массивов высокоэффективных волоконных решёток Брэгга. Дисс. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018.

Т.П. ЯНУКОВИЧ, А.С. ИСМАЙЛОВА, А.Д. ДЖУНГ
Белорусский государственный университет, Минск

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННОГО СЕНСОРА СИЛЫ ТОКА

Рассмотрено моделирование работы оптоволоконного сенсора силы тока на основе регистрации деформационного сигнала с использованием вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна. Описан метод разделения паразитного температурного и деформационного сигнала.

T.P. YANUKOVICH, A.S. ISMAYILOVA, A.D. JUNG
Belorussian State University, Minsk

MATHEMATICAL MODEL OF OPTICAL FIBER CURRENT SENSOR

The simulation of the operation of a fiber optic current sensor based on the registration of a deformation signal using stimulated Mandelstam–Brillouin scattering is considered. A method for separating the parasitic temperature and deformation signal is described.

В связи с развитием систем автоматизации и контроля большой интерес вызывают методы и приборы для измерения силы тока. Недостатком используемых сейчас систем измерения силы тока являются большие погрешности используемого оборудования и ограничения в его применимости. Большое значение имеет независимость измерительного устройства от измеряемой величины. Оптические датчики независимы от внешних полей, имеют малые габариты и достаточно просты в монтаже.

Схема установки для измерения силы тока методом анализа бриллюэновского оптического частотного домена представлена на рис. 1.

В качестве чувствительного элемента сенсора используется одномодовое оптическое волокно. Участки волокна закреплены вдоль токовых шин и покрыты проводящей оболочкой из алюминия. При пропускании тока по проводящей оболочке между шиной и оболочкой волокна возникает сила Ампера, она вызывает деформацию оптического волокна [1].

Для оптических волокон с добавлением GeO_2 усиление стоксовой волны изменяется в зависимости от величины температуры и деформации волокна.

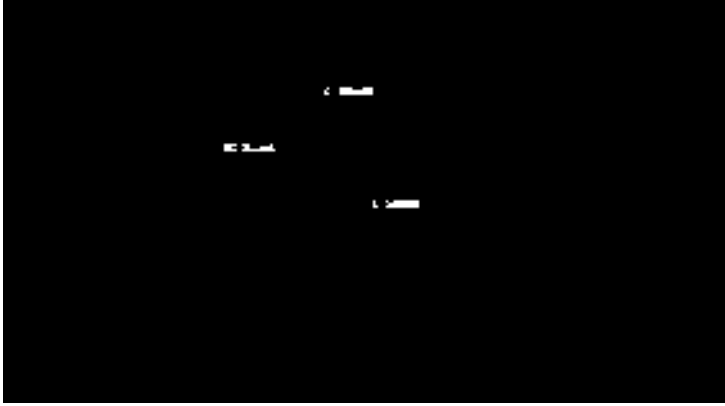


Рис. 1. Схема установки для измерений тока оптоволоконным сенсором

Используя данные об изменении усиления, было проведено моделирование работы оптоволоконного сенсора на основе рассеяния Мандельштама–Бриллюэна и получена его передаточная функция [2]. Величина передаточной функции различна для изменения температуры и деформации из-за различных коэффициентов усиления (рис. 2), что позволяет разделить паразитный температурный сигнал и полезный деформационный.

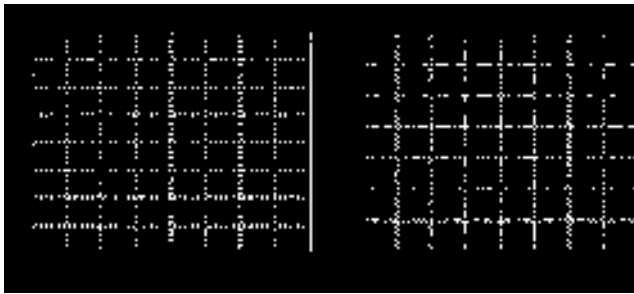


Рис. 2. Зависимость передаточной функции от разности частот накачки и пробного сигнала в случае деформационного (а) и температурного (б) воздействия

Список литературы

1. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Приборы и методы измерений. 2019. Т. 10. № 3. С. 243-252.
2. Янукович Т.П., Поляков А.В. // Компьютерные технологии и анализ данных: Матер. II Межд. науч.-практ. конф. Минск : БГУ, 2020. С. 116-120.

В.А. КЛИШИНА, С.В. ВАРЖЕЛЬ, В.А. КУЛИКОВА,
М.В. СКОВОРОДКИНА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА

В работе представлен разработанный волоконно-оптический чувствительный элемент датчика скорости потоков жидкостей и/или газов, а также газожидкостных смесей. Разработанный элемент реализован с применением технологии «горячей проволоки», в котором в качестве нагревательного и измерительного элемента используются специальные структуры оптических волокон.

V.A. KLISHINA, S.V. VARZHEL, V.A. KULIKOVA,
M.V. SKOVORODKINA

ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT OF A FIBER-OPTICAL FLOW SENSOR SENSITIVE ELEMENT OF SPEED AND DIRECTION

The paper presents the developed fiber-optic sensing element for the measuring of the flow velocity of liquids and/or gases, as well as gas-liquid mixtures. The developed element is implemented using the «hot wire» technology, in which special structures of optical fibers are used as a heating and measuring element.

Одним из перспективных направлений развития сенсорных систем в различных областях промышленности является использование оптических технологий, в частности, волоконно-оптических. Среди основных методов измерения широкого спектра различных физических величин выделяют использование специальных волоконных дифракционных структур. К преимуществам их применения относятся нечувствительность к электромагнитным помехам, компактность, возможность мониторинга на значительном удалении от области/объекта измерения, возможность эксплуатации в условиях высоких температур и давлений, а также быстрый отклик, радиационностойкость и пр.

В настоящее время измерительные устройства на основе чувствительных элементов с дифракционными структурами, иначе называемыми волоконными брэгговскими решётками (ВБР), используются в различных областях промышленности: строительство,

медицина, космическая и авиационная отрасли, геодезия и т.д. Кроме того, существуют устройства, применение которых необходимо для решения задач сразу в нескольких отраслях. К ним можно отнести анемометры и велосиметры – устройства для измерений скоростей потоков газов и жидкостей, применяющиеся в метеорологии, медицине, а также газо- и нефтедобывающей отраслях.

Принцип действия устройств на основе ВБР основан на анализе отражённого от таких структур излучения на длине волны брэгговского резонанса, которая зависит от условий окружающей среды (температуры, давления, растяжения и т.д.).

Данная работа посвящена разработке оригинальной конструкции чувствительного элемента, реализованного на применении стандартного метода «горячей проволоки», при этом металлическая нить была заменена на оптическое волокно. Для выбора наиболее оптимального метода создания волоконно-оптической «горячей проволоки» были проведены исследования различных методов выведения оптического излучения из сердцевины в оболочку [1]. Наиболее эффективное выведение излучения продемонстрировали оптические волокна с тейпером (участок волокна с перетяжкой), сформированном в многомодовом оптическом волокне, которое было подключено к лазеру накачки. В качестве измерителя использовался массив ВБР, что позволило проанализировать в работе направление потока вдоль чувствительного элемента и перпендикулярно ему. Область ВБР была совмещена с областью тейпера и в месте соединения оба волокна фиксировались с помощью сплава на основе олова и свинца. Охлаждение «горячей проволоки» напрямую связано со скоростью протекающих потоков, таким образом, измерение температуры чувствительного элемента посредством анализа сдвига длины волны брэгговского резонанса позволяет использовать такой чувствительный элемент в качестве измерителя скорости потоков.

Полученные результаты могут быть применимы в различных областях промышленности, где использование металлических конструкций невозможно ввиду ограниченности их температурного диапазона, подверженности окислению и коррозии, восприимчивости к электромагнитным помехам и задержке отклика на быстро изменяющиеся внешние условия.

Список литературы

1. Новикова В.А., Варжель С.В. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20 (4). С. 500-506.

Д.П. СУДАС, К.М. ГОЛАНТ

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ЭФФЕКТ ОПТИЧЕСКОГО ПИНЦЕТА В ВОЛОКОННЫХ РЕФРАКТОМЕТРАХ

Созданы волоконные рефрактометры на основе утонённых многомодовых световодов покрытых плёнками оксида титана и олова. По движению узкого провала (резонанса) в спектре пропускания оптического тракта оценивалась концентрация взвешенных в жидкости частиц живых клеток водорослей. Перед измерениями клетки, взвешенные в жидкости, концентрировались на поверхности сенсора из-за эффекта оптического пинцета. Частицы вытягивались из суспензии введением в волокно излучения от различных источников. Впервые феномен оптического пинцета применён с использованием эванесцентного поля утонённого световода.

D.P. SUDAS, K.M. GOLANT

Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

THE EFFECT OF OPTICAL TWEEZERS IN FIBER REFRACTOMETERS

Fiber refractometers based on thinned multimode optical fibers coated with titanium oxide and tin oxide films have been created. The movement of a narrow dip (resonance) in the transmission spectrum of the optical path was used to estimate the concentration of particles of living algae cells suspended in the liquid. Before measurements, cells suspended in liquid were concentrated on the surface of the sensor due to the effect of optical tweezers. Particles were drawn out of the suspension by introducing radiation from various sources into the fiber. For the first time, the phenomenon of optical tweezers was applied using the evanescent field of a thinned fiber.

Оптический пинцет – проверенный метод воздействия на нано- и микрочастицы [1]. Явление, при котором под действием оптического излучения частицы, попадая в градиент оптического поля, стремятся попасть в точку с наибольшей интенсивностью и оставаться в этой точке. С помощью химического утонения участка волокна и запуска света в волокно можно создать область, в которой градиент интенсивности будет иметь максимум вблизи поверхности волокна [2].

Сегмент многомодового волокна, протравленный до диаметра 90 мкм на отрезке длиной 3,5 мм и покрытый тонкой двухслойной плёнкой

($\text{TiO}_2/\text{SnO}_2$), помещался в водный раствор, содержащий микроводоросли. Под действием затухающего оптического поля клетки микроводорослей притягиваются к поверхности волокна в окрестности оголённой сердцевины волокна и группируются при максимуме радиального градиента на границе (рис. 1). Сдвиг резонанса показывает, что в сенсорно-чувствительной области, примыкающей к волокну, увеличивается оптическая плотность среды, а, следовательно, увеличивается количество клеток водорослей, причём чем больше сдвиг, тем больше микроводорослей клеток на поверхности волокна.

На рис. 2 показано сравнение сдвига резонанса в водном растворе с водорослями оптического при введении в волокно излучения от различных источников. Сравнение воздействия оптического пинцета на утончённый отрезок волокна при использовании разных источников света показало, что по сравнению со светом от лампы накаливания влияние когерентного излучения значительно сильнее. Наилучший результат показал источник суперконтинуума с широким спектром генерации света в диапазоне длин волн от 360 до 1800 нм и интегральной мощностью в видимой области спектра около 10 мВт. Однако, излучение с длиной волны короче 590 нм стимулирует фотокатализ на поверхности плёнки диоксида титана, поэтому использование ИК-лазера предпочтительнее так как эффект в разы больше чем от лампы и не вызывает ухудшение характеристик сенсора.



Рис. 1. Фотография утончённой секции световода

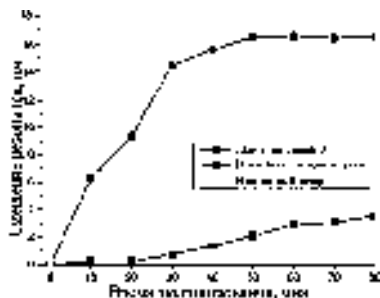


Рис. 2. Смещение резонанса при разных источниках оптического пинцета

Работа выполнена в рамках Государственного задания Фрязинского филиала ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Список литературы

1. Ashkin A., et al. // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 288-290.
2. Gupta B.D. // New India Publishing. New Delhi. 2006. V. 5. P. 59-64.

Д.Н. ШУРУПОВ^{1,2}, Г.А. ПЧЕЛКИН^{1,3}, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,4,5},
Д.В. БУЛЫГА⁴, А. МУССАУИ⁴, В.В. ДЕМИДОВ¹

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

⁴Университет ИТМО, Санкт-Петербург

⁵Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Разработаны и охарактеризованы люминесцентные датчики температуры новой конструкции на основе нанокристаллов YAG:Ln³⁺ (Ln = Nd, Yb, Ce) и многомодовых оптических волокон. Функциональность сенсора определяется температурно-зависимым изменением интенсивности люминесценции ионов неодима (Nd³⁺), иттербия (Yb³⁺) и церия (Ce³⁺), введенных в матрицу YAG. Полученные материалы показали высокую чувствительность интенсивности люминесценции к изменению температуры на длинах волн 1064 нм (YAG:Nd³⁺), 550 нм (YAG:Ce³⁺) и 1030 нм (YAG:Yb³⁺) в диапазоне температур 50 - 600 °С.

D.N. SHURUPOV^{1,2}, G.A. PCHELKIN^{1,3}, S.K. EVSTROPIEV^{1,4,5},
D.V. BULYGA⁴, A. MOUSSAOU⁴, V.V. DEMIDOV¹

¹S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

³The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

⁴ITMO University, Saint-Petersburg

⁵Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

LUMINESCENT FIBER-OPTIC SENSORS OF A NEW DESIGN FOR HIGH-TEMPERATURE MEASUREMENTS

Luminescent temperature sensors of a new design based on YAG:Ln³⁺ (Ln = Nd, Yb, Ce) nanocrystals and multimode optical fibers have been developed and characterized. The functionality of this sensor is determined by the temperature-dependent change in the luminescence intensity of neodymium (Nd³⁺), ytterbium (Yb³⁺), and cerium (Ce³⁺) ions introduced into the YAG matrix. The materials obtained showed a high sensitivity of the luminescence intensity to temperature changes at wavelengths of 1064 nm (YAG:Nd³⁺), 550 nm (YAG:Ce³⁺) and 1030 nm (YAG:Yb³⁺) in the range of 50 - 600 °C.

Контроль температуры является ключевым процессом во многих современных технологических процессах, таких как спекание керамики, химические реакции и изготовление металлических сплавов [1].

На рис. 1 представлена общая схема люминесцентного датчика температуры новой конструкции. Датчик состоит из запаянного с одной стороны кварцевого капилляра с внутренним диаметром 1,5 мм, внешним диаметром 2,5 мм и длиной 45 мм. Капилляры частично заполняли нанокристаллическим порошком $YAG:Ln^{3+}$ ($Ln = Nd, Yb, Ce$) одинакового объёма для каждого активатора. Внутри капилляров в непосредственной близости от поверхности порошка располагались два отрезка многомодовых световодов с высокой числовой апертурой и сердцевиной из чистого кварца диаметром 400 мкм для доставки излучения от источника возбуждения и излучения люминесценции к детектору.

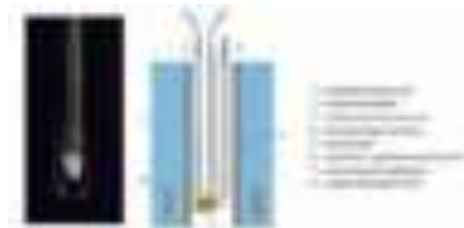


Рис. 1. Фото и схематическое изображение конструкции люминесцентного ВОД температуры

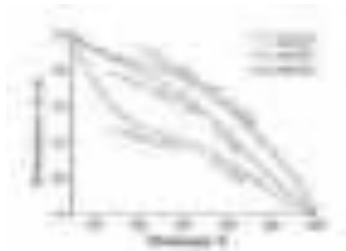


Рис. 2. Графики зависимости амплитуды сигнала люминесценции от температуры

На рис. 2 сопоставлены экспериментально полученные данные для всех нанокристаллических порошков $YAG:Ln^{3+}$. Амплитуда оптического сигнала датчика снижается с ростом температуры, что свидетельствует о характерном температурном тушении люминесценции и корректной работоспособности прибора вплоть до температур 600 °С.

Функциональность этого сенсора определяется температурно-зависимым изменением интенсивности люминесценции ионов неодима (Nd^{3+}), иттербия (Yb^{3+}) и церия (Ce^{3+}), введённых в матрицу YAG . Полученные материалы показали высокую чувствительность интенсивности люминесценции к изменению температуры на длинах волн 1064 нм ($YAG:Nd^{3+}$), 550 нм ($YAG:Ce^{3+}$) и 1030 нм ($YAG:Yb^{3+}$) в диапазоне температур 50 - 600 °С.

Список литературы

1. Guo H., Baker A., Guo J., Randal C.A. // J. Am. Ceram. Soc. 2016. V. 99 (11). P. 3489-3507.

А.Л. ВОЛОШИНА, А.А. ДМИТРИЕВ, С.В. ВАРЖЕЛЬ,
А.И. КОЗЛОВА, В.В. САВИН, В.А. КОМИСАРОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА АМПЛИТУДНОГО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Разработан чувствительный элемент амплитудного датчика температуры на основе суперпозиций чирпированных волоконных брэгговских решёток. Конструкция позволяет масштабировать сигнал, повышая чувствительность и точность измерения температуры. Амплитудный опрос датчика отличается высокими точностью и скоростью измерения сигнала, минимизированной схемой, упрощённым использованием и облегчённой обработкой полученного сигнала.

A.L. VOLOSHINA, A.A. DMITRIEV, S.V. VARZHEL,
A.I. KOZLOVA, V.V. SAVIN, V.A. KOMISAROV

ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE AMPLITUDE FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR

The development of an amplitude temperature sensor based on superimposed chirped fiber Bragg gratings, that allows to change the signal value and increase the sensitivity and accuracy of temperature measurements, was presented. The amplitude polling technique is characterized by high accuracy and speed of measurement, minimized scheme, simplified use and easy processing of the detected signal.

Волоконно-оптические датчики на основе решёток Брэгга находят применение в качестве системы контроля деформации строительных конструкций [1] и давления криогенного топлива [2], мониторинга состояний конструкций морской лодки [3], анализа питьевой воды [4], измерения жесткости горных пород [5] и других приложений.

Актуальными задачами в области разработки волоконно-оптических датчиков являются повышение чувствительности и точности прибора, а также создание его оптимальной схемы опроса.

Данная работа посвящена апробации методики измерения температуры с помощью амплитудного датчика на основе суперпозиций чирпированных волоконных брэгговских решёток (ЧВБР).

С помощью KrF эксимерной лазерной системы и интерферометра Тальбота изготовлены суперпозиции, состоящие из двух ЧВБР с частичным перекрытием спектров (рис. 1). Чувствительный элемент датчика представлял собой опорную и чувствительную суперпозицию и позволял проводить измерения в диапазоне от -11 до 134 °С.

Проведены температурные испытания изготовленной части сенсора при температурах от 30 до 70 °С (рис. 2). Чувствительность датчика составила $0,20$ мкВт/°С, а точность – $0,48$ °С.

В результате работы испытана методика создания чувствительного элемента амплитудного волоконно-оптического датчика температуры с n -пар ЧВБР, позволяющая масштабировать величину сигнала. Реализованный амплитудный опрос обладал высокоточными и высокоскоростными измерениями сигнала, простой конфигурацией схемы с доступными компонентами, облегчёнными требованиями к условиям эксплуатации.

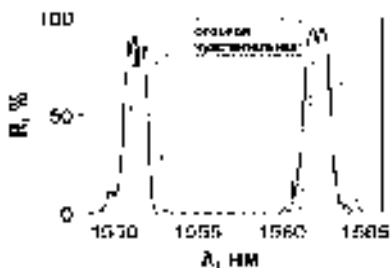


Рис. 1. Спектр отражения структур

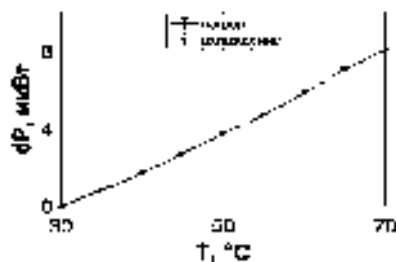


Рис. 2. Температурный отклик

Список литературы

1. Kaur G, Kaler R.S., Kwatra N. Experiment on a highly sensitive fiber Bragg grating optical sensor to monitor strain and corrosion in civil structures // J. Opt. Technol. 2018. V. 85. No. 1.
2. Hegde G, Prasad M.V.N., Asokan S. Temperature compensated diaphragm based Fiber Bragg Grating (FBG) sensor for high pressure measurement for space applications // Microelectron. Eng. 2021. V. 248.
3. Mieloszyk M., Majewska K., Ostachowicz W. Application of embedded fibre Bragg grating sensors for structural health monitoring of complex composite structures for marine applications // Mar. Struct. 2021. V. 76.
4. Kumar N.V., BS K., Asokan S. Selective detection of lead in water using etched fiber Bragg grating sensor // Sensors Actuators B Chem. 2022. V. 354.
5. Isah B.W., Mohamad H., Ahmad N.R. Rock stiffness measurements fibre Bragg grating sensor (FBGs) and the effect of cyanoacrylate and epoxy resin as adhesive materials // Ain Shams Eng. J. 2021. V. 12. No. 2.

Л.Л. ХОМУТИННИКОВА¹, И.К. МЕШКОВСКИЙ¹,
С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, М.Ю. ЛИТВИНОВ¹,
С.А. ПЛЯСЦОВ¹, Е.П. БЫКОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

³Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ МЕТАНА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ СЕНСОРОМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ ФОТОКАТАЛИЗАТОРА ZnO-SnO₂-Fe₂O₃

Приведены результаты экспериментов по разработке фотокаталитического волоконно-оптического детектора метана. Продемонстрирован принцип работы детектора, согласно которому происходит экзотермическое окисление метана на поверхности волоконно-оптического чувствительного элемента, которое детектируется при помощи волоконной брэгговской решётки.

L.L. KHOMUTINNIKOVA¹, I.K. MESHKOVSKY¹,
S.K. EVSTROPYEV^{1,2,3}, M.Yu. LITVINOV¹,
S.A. PLYASTSOV¹, E.P. BYKOV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²Saint-Petersburg State Technological Institute (Technical University)

³S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

DETECTION OF METHANE BY A FIBER-OPTIC SENSOR USING A ZnO-SnO₂-Fe₂O₃ PHOTOCATALYST

The results of experiments on the development of a photocatalytic fiber-optic methane detector are presented. The principle of operation of the detector is demonstrated, according to which exothermic oxidation of methane occurs on the surface of a fiber-optic sensing element, which is detected using a fiber optic Bragg grating.

Метан является природным легколетучим и взрывоопасным газом, который при концентрации 4 - 5 % в воздухе может образовывать взрывоопасные смеси [1]. Поэтому моментальное обнаружение газа является важной задачей для обеспечения безопасного производства.

Целью работы является детектирование метана волоконно-оптическим сенсором при помощи фотокаталитического композита (ФК),

позволяющего быстро зафиксировать присутствие газа за счёт выделения тепла при реакции окисления. Фотоокислительное детектирование метана недостаточно изучено [2, 3].

В качестве активного элемента (детектора) использовался ФК, содержащий 95 % ZnO, 3 % SnO₂, 2 % Fe₂O₃ [4]. Экзотермический эффект детектировался с помощью волоконно-оптического датчика за счёт регистрации изменения длины волны брэгговского резонанса волоконной брэгговской решётки (ВБР) при распространении света в оптическом волокне (ОВ) [5, 6]. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Эксперимент проводили следующим образом: в кварцевую трубку помещали 0,05 ФК и 0,5 мл дистиллированной воды. ВБР была погружена в смесь. После закачки метана (P = 1,5 атм), смесь облучали УФ с длиной излучения 256 нм в течение 15 мин. Изменение резонансной длины волны в ходе фотоокисления метана $\Delta\lambda_{\text{ФК}}$ измеряли каждые 30 с. Для перевода значений $\Delta\lambda_{\text{ФК}}$ в температурные значения использовалась следующая формула:

$$\Delta T = (\Delta\lambda_{\text{ФК}})/K_T,$$

где K_T – температурная чувствительность используемой ВБР.

На рис. 2 представлен график изменения температуры при экзотермическом фотоокислении метана.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки

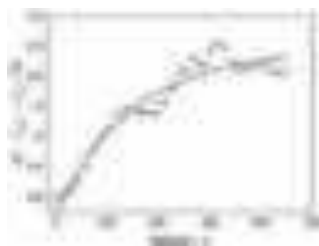


Рис. 2. График изменения температуры при экзотермическом фотоокислении метана

Список литературы

1. Floridia C., Rosolem J.B., et al. // *Remote Sens.* 2019. V. 11. P. 1249.
2. Liu F., Zhang Y., et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2011. V. 160 (1). P. 1091-1097.
3. Vuong N.M., Hieu N.M., et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2014. V. 192. P. 327.
4. Khomutinnikova L.L., Evstropiev S.K., et al. // *Journal of Composites Science.* 2022. V. 6 (11). P. 331.
5. Стам А.М., Идрисов Р.Ф. и др. // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2017. Т. 60 (5). С. 466-473.
6. Коннов К.А., Фролов Е.А. и др. // *Оптика и спектроскопия.* 2018 Т. 125 (1). С. 51-56.

Т.И. МУРАШКИНА, Т.В. ПАРШИКОВА, Е.Ю. ПЛОТНИКОВА¹

Пензенский государственный университет

¹Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ И КОНФИГУРАЦИИ НЁБА ПАЦИЕНТА С ПОМОЩЬЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО СКАНЕРА

Предлагается новое изобретение – волоконно-оптический сканер для определения размеров и конфигурации нёба пациента. Описан принцип его действия, приведена схема, описывающая его. Представлена упрощённая конструкция устройства. Выделены достоинства волоконно-оптического сканера.

T.I. MURASHKINA, T.V. PARSHIKOVA, E.Yu. PLOTNIKOVA¹

Penza State University

¹Kuban State Medical University, Krasnodar

DETERMINATION OF THE SIZE AND CONFIGURATION OF THE PATIENT'S PALATE USING A FIBER-OPTIC SCANNER

A new invention is proposed – a fiber-optic scanner for determining the size and configuration of the patient's palate. The principle of its operation is described, a diagram describing it is given. A simplified design of the device is presented. The advantages of the fiber-optic scanner are highlighted.

Перед нами стоит задача разработки комплексного подхода к определению диагностических признаков челюстно-лицевых патологий и других заболеваний органов лица и шеи с помощью современных средств измерений для получения достоверной и своевременной информации и установления окончательного диагноза.

Авторами статьи (в соавторстве) предлагается новое изобретение — волоконно-оптический сканер для определения размеров и конфигурации нёба [1]. Это изобретение используется при диагностике заболеваний, связанных с аномалиями ротовой полости, челюстно-лицевых патологий, в первую очередь, у детей.

На рис. 1 представлена упрощённая конструкция волоконно-оптического сканера нёба, а на рис. 2 – представлена схема, поясняющая принцип действия сканера.

В корпусе располагается оптическая система в виде подводящего (ПОВ) и отводящего (ООВ) оптических волокон. Световой поток от

источника излучения по ПОВ направляется на нёбо. Отражённый от него световой поток поступает в приёмный торец ООВ и направляется по нему на приёмник излучения, где преобразуется в электрический сигнал. Корпус перемещается вдоль первой впадины, в некоторых точках с одинаковыми интервалами с выхода приёмника излучения снимаются электрические сигналы, пропорциональные расстояниям от излучающего торца ПОВ до нёба в данных точках. Результаты заносятся в первую строку матрицы электрических сигналов, которая потом преобразуется в матрицу длины.

Затем аналогичные операции повторяют в каждой впадине, так заполняется матрица длины, в соответствии с которой впоследствии осуществляется 3D-моделирование нёба.

Данный способ определения размеров и конфигурации нёба пациента позволяет уменьшить неудобства для пациентов, также снизить инструментальную и методическую погрешности измерений. Кроме того, сканер располагается в малом объёме рта пациента, то есть он может использоваться для детей. Что немало важно — исключается электромагнитное излучение в полости рта пациента, так как используется абсолютно безопасное оптическое излучение мощность не более 10 мкВт.



Рис. 1. Упрощённая конструкция волоконно-оптического сканера нёба:
1 – основание, 2 – n -направляющие,
3 – корпус, 4 – ПОВ, 5 – ООВ



Рис. 2. Схема, поясняющая принцип действия сканера, ЧЭ - чувствительный элемент

Работа проведена при поддержке Российского научного фонда и администрации Краснодарского края в виде гранта № 22-15-20069

Список литературы

1. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Гайворонская Т.В., Серебряков Д.И., Кукушкин А.Н., Аюпова Ф.С., Васильев Ю.А., Плотникова Е.Ю., Паршикова Т.В. Способ определения размеров и конфигурации нёба и волоконно-оптический сканер для его реализации. Заявка на изобретение № 2022118864. Приоритет 20 11.07.2022.

Д.В. БОЛОТОВ, С.Ю. КАЗАНЦЕВ, О.В. КОЛЕСНИКОВ,
О.А. КОМАРОВ

Московский технический университет связи и информатики

ЗАЩИТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЙ АТМОСФЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

Показано, что деструктивное влияние грозовой активности на стабильность работы телекоммуникационных сетей в последние годы растет. Выявлено, что на протяжённые квантовые сети, в которых реализуется технология квантового распределения ключей, разряды молний могут оказывать значительное влияние, вызывая рост квантовых ошибок (QBER). Рассмотрены возможности применения активных и пассивных методов защиты от молний.

D. V. BOLOTOV, S. Yu. KAZANTSEV, O. V. KOLESNIKOV,
O. A. KOMAROV

Moscow Technical University of Communications and Informatics

PROTECTION OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES FROM LIGHTNING

An analysis of standard and advanced solutions offered in the field of lightning protection for main communication lines and communication centers is presented. It is shown that lightning discharges can have a significant impact on extended quantum networks in which quantum key distribution technology is implemented, causing an increase in quantum errors (QBER). The possibilities of using active and passive methods of lightning protection are considered.

Для проводных систем связи, протяжённость которых может составлять многие десятки и сотни километров актуальной задачей становится их защита от молний [1]. Разряды молний порождают различные физические явления (ударно-волновые возмущения, рентгеновское излучение, мощные электромагнитные поля), результатом которых является ускоренная деградация оптического кабеля, поэтому постоянно совершенствуются методы защиты волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) [1, 2]. Угрозы безопасности передаваемых по ВОЛС данных сегодня предлагают решать с помощью применения технологии квантового распределения ключей (КРК), которая предполагает передачу информации с помощью одиночных фотонов [3]. Использование технологии КРК в ВОЛС предъявляет высокие требования к стабильности

оптических потерь вдоль всей трассы. Целью настоящей работы являлся анализ динамики грозовой активности и поиск информации в области методов защиты ВОЛС от молний, которые будут эффективны, в том числе и для протяжённых квантовых сетей, где информация передается одиночными фотонами [3].

Проведён анализ распределения публикационной активности в области защиты телекоммуникационных сетей от молний, выявлены страны и организации, лидирующие по числу публикаций, и организации, осуществляющие финансирование этих работ. На рис. 1а показана динамика публикационной активности в области молниезащиты телекоммуникационных сетей, а на рис. 1б распределение по странам научных статей, индексируемых в базе SCOPUS за последние пять лет. Исследование статистики молний показало существенное увеличение частоты появления молний в северных регионах планеты, что связывается с глобальным потеплением, а также рост сообщений о деструктивном влиянии молний на системы телекоммуникаций, в том числе квантовые сети. Анализ этих работ позволил выявить современные подходы, предлагаемые для защиты от молний магистральных линий связи и узлов связи.

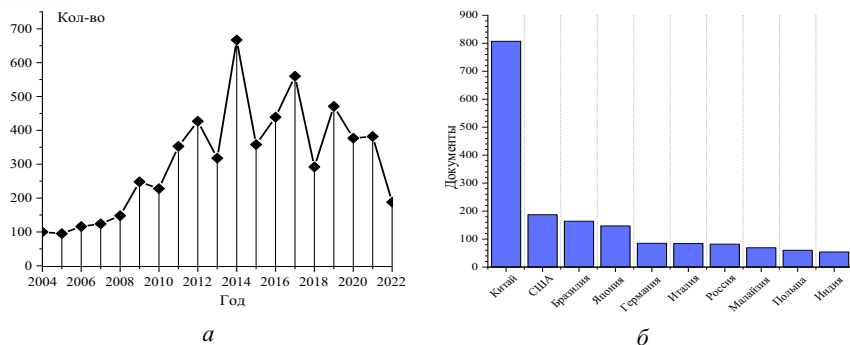


Рис. 1. Динамика публикаций в индексируемых изданиях в области молниезащиты (а); распределение рецензируемых публикаций по странам (б)

Список литературы

1. Соколов С.А. Воздействие внешних электромагнитных полей на оптические кабели связи и гибридные линии. М.: Горячая линия-Телеком, 2018.
2. Колесников О.В. и др. // Технологии информационного общества: Сборник трудов XV Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», 2021. С. 47-48.
3. Миронов Ю.Б. и др. //Научное исследование в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22-33.

Е.С. БЕЗБОРОДОВА, Н.В. ХОМЧЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

ОЦЕНКА ДИСПЕРСИИ СИГНАЛА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ С УЧЁТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Приведены результаты зависимости удельной материальной дисперсии, удельной волноводной дисперсии и удельной хроматической дисперсии от длины волны для оптимизации профиля показателя преломления волокна путём минимизации суммарной дисперсии.

E.S. BEZBORODOVA, N.V. HOMCHENKO
Kuban State University, Krasnodar

EVALUATION OF SIGNAL DISPERSION IN A FIBER-OPTICAL COMMUNICATION LINE TAKING INTO ACCOUNT THE SPECTRAL DEPENDENCE OF THE REFRACTIVE INDEX

The results of the dependence of the specific material dispersion, specific waveguide dispersion and specific chromatic dispersion on wavelength for optimizing the refractive index profile of the fiber by minimizing the total dispersion are presented.

Материальная дисперсия появляется в результате зависимости показателя преломления волокна от длины волны.

Построение зависимости удельной материальной дисперсии от длины волны (рис. 1) проводилось по формуле (1) для кварцевого стекла (7 % GeO₂, 93 % SiO₂) [1].

$$n^2(\lambda) = l + \sum_{i=1}^3 A_i \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}, \quad (1)$$

Построение зависимости удельной волноводной дисперсии от длины волны (рис. 2) проводилось по формуле (2).

$$\tau_{вол} = \Delta\lambda LB(\lambda) = \Delta\lambda L \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda}, \quad (2)$$

Построение зависимости удельной хроматической дисперсии от длины волны (рис. 3) проводилось по формуле (3) [2].

$$D(\lambda) = M(\lambda) + B(\lambda). \quad (3)$$

Коэффициент удельной дисперсии численно равен увеличению длительности длины светового импульса (в пикосекундах), спектральная ширина которого равна 1 нм, после прохождения волокна длиной 1 км.

Из рис. 3 следует, что для исследованного оптоволокну длина волны с нулевой хроматической дисперсией равна примерно 1430 нм, для $\lambda < 1430$ нм хроматическая дисперсия положительна и для $\lambda > 1430$ нм удельная хроматическая дисперсия отрицательна.

При создании квантово-криптографических систем знание зависимости хроматической дисперсии от длины волны позволяет оптимизировать профиль показателя преломления волокна путём минимизации суммарной дисперсии на определённой длине волны за счёт взаимной компенсации материальной и волноводной дисперсии.

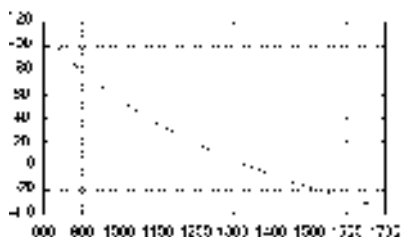


Рис. 1. Зависимость удельной материальной дисперсии от длины волны (по оси $x - \lambda$, нм; $y - M(\lambda)$, пс / (км * м))

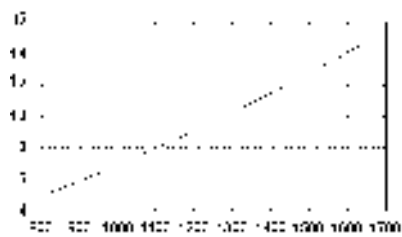


Рис. 2. Зависимость удельной волноводной дисперсии от длины волны (по оси $x - \lambda$, нм; $y - B(\lambda)$, пс / (км * м))

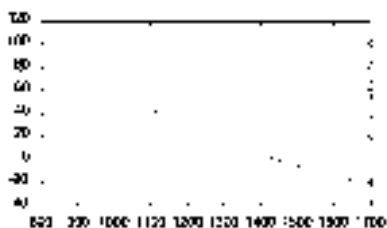


Рис. 3. Зависимость удельной хроматической дисперсии от длины волны (по оси $x - \lambda$, нм; $y - D(\lambda)$, пс / (км * м))

Список литературы

1. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. М.: Лань, 2021.
2. Дмитриев С.А., Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. М.: ООО "Волоконно-оптическая техника", 2005.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ
РЕФЛЕКТОГРАММ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН,
НАХОДЯЩИХСЯ В РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ**

В работе рассмотрены вопросы автоматизации обработки данных, полученных от бриллиэновского рефлектометра, для получения частотных характеристик, данных о натяжении и температуре одномодовых оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**A PROCESSING AUTOMATION OF BRILLOUIN
REFLECTOGRAMS OF OPTICAL FIBERS IN VARIOUS STATES**

This work considers the issues of the automation data processing received from the Brillouin reflectometer to obtain frequency characteristics, data of the strain and temperature of single-mode optical fibers.

Наличие базы данных характеристик рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (РМБ), профилей частотного спектра РМБ (СРМБ) одномодовых оптических волокон (ОВ) различных типов и производителей позволяет классифицировать ОВ в проложенных телекоммуникационных линиях, а также обнаруживать в них дефектные участки [1, 2]. Данные, необходимые для анализа частотного профиля СРМБ, могут быть получены как из графика распределения СРМБ вдоль световода, так и из бриллиэновских мультирефлектограмм. С целью автоматизации и ускорения процесса определения типа ОВ по данным бриллиэновских рефлектограмм, классификации потенциально опасных факторов, оценки изменений бриллиэновского частотного сдвига (БЧС) и натяжения в ОмГТУ были разработаны специальные программы [1, 2].

Для более точной классификации разновидностей ОВ и определения БЧС, а затем, и натяжения, следует усовершенствовать алгоритм оценки.

Для этого необходимо устранить влияние различного масштабирования графиков по осям, а также смещения шаблона по БЧС из-за изменения натяжения или температуры ОВ [1, 2]. Формирование оси частот необходимо уточнить. На рис. 1 приведена часть файла данных с информацией, необходимой для получения координат по оси частот.

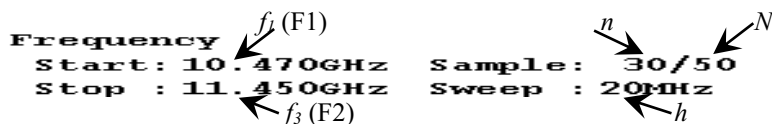


Рис. 1. Определение характеристик сканирования и сетки частот

Сканирование по частоте для получения рефлектограммы стартует с начальной частоты f_1 ($f_1 = 10.47$ ГГц = F1) при шаге h ($h = 20$ МГц). Конечная частота сканирования f_3 ($f_3 = 11.45$ ГГц = F2) достигается при прохождении всех точек разбиения ($n = N = 50$). Но процесс сканирования можно остановить на любом шаге n (например, $n = 30$ на рис. 1), и в этом случае конечная частота диапазона определяется по следующей формуле:

$$f_2 = f_1 + h(n-1), \quad f_3 = f_1 + hN. \quad (1)$$

Для данных сканирования на рис. 1 $f_2 = 11.05$ ГГц. На оси ординат максимальное значение A (f_{max}) будет наблюдаться при БСЧ ($f_{max} = f_B$).

На рис. 2 показаны СРМБ исследуемого ОВ и сравниваемый образец из базы данных. Для исследуемого профиля СРМБ получаем $f_i = 10.55$ ГГц, $f_2 = 11.05$ ГГц, $h_i = 100$ МГц, $h_d = 20$ МГц.

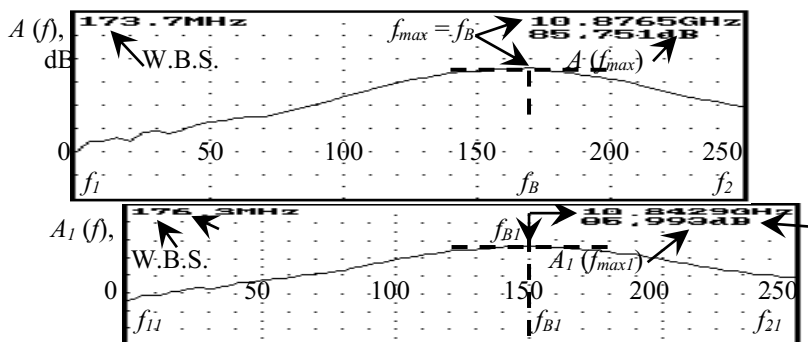


Рис. 2. Масштабирование СРМБ исследуемого ОВ и шаблона

Для уточнения оценки степени совпадения исследуемых профилей СРМБ необходимо определить общую часть диапазона частот для анализа (в рассматриваемом примере она составит от 10.55 ГГц до 11.04 ГГц), а также «выровнять» положение максимумов.

Список литературы

1. Богачков И.В., Тюленев А.С. Программа для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон // Сб. тр. X Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. С. 357-358.
2. Богачков И.В., Комисарчук Н.А. Программа для анализа бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон // Сб. тр. IX Межд. конф. по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 585-586.

А.С. БОБЕ^{1,2}, А.О. ВОЗНЕСЕНСКАЯ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²ООО «Геофотоника», Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРОТОЧНОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ И МОНИТОРИНГА

Разработана общая функциональная схема оптических датчиков для применения в промышленных проточных системах. Проанализированы различные схемы блоков источника излучения, оптического зонда и анализаторов излучения. Определены спектральные передаточных характеристики для различных схем построения оптических датчиков, приведены рекомендации по выбору и разработке систем оптического мониторинга в промышленных системах.

A.S. BOBE^{1,2}, A.O. VOZNESENSKAYA¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²LLC «Geophotonica», Saint-Petersburg

STUDY OF IN-LINE OPTICAL SYSTEMS FOR AUTOMATION AND MONITORING OF INDUSTRIAL FLOW-THROUGH SYSTEMS

A general functional diagram of optical sensors for use in industrial flow systems has been developed. Various block diagrams of the radiation source, optical probe, and radiation analyzers are analyzed. The spectral transfer characteristics for various schemes for constructing optical sensors are determined, recommendations are given for the selection and development of optical monitoring systems in industrial systems.

В настоящее время системы динамического проточного мониторинга быстро развиваются и находят широкое применение в различных производственных и промышленных процессах. Такие методы могут использоваться, например, в нефтяной промышленности для определения состава пластового флюида во время геологоразведки, в пищевой и фармакологической промышленности для контроля качества продукции [1 - 3].

Проточный анализ позволяет получать информацию об образце в режиме онлайн и облегчает отбор проб для дальнейшего исследования в лабораторных условиях, что является актуальной задачей для цифровизации и автоматизации производства [4].

Целью работы является построение общей схемы проточных оптических датчиков, анализ схем и конфигураций различных блоков подобных систем и составление рекомендаций по выбору и разработке оптических датчиков для проточного мониторинга в промышленных системах.

Общая схема оптического датчика проточного анализа представлена на рис. 1.

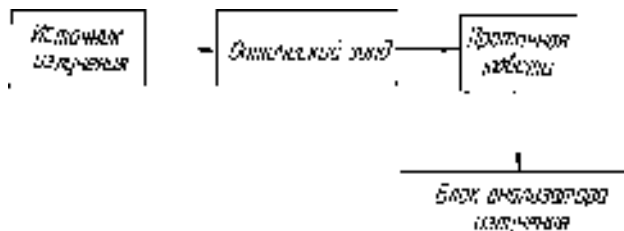


Рис. 1. Функциональная схема оптического датчика проточного анализа

В общем случае излучение с источника излучения поступает в оптический зонд, по которому распространяется до образца и затем анализируется блоком анализатора. В зависимости от внешних условий проточного анализа, характеристик образцов в протоке и необходимых результатов мониторинга используются различные оптические датчики и их комбинации. В ходе работы определены спектральные передаточные характеристики блоков устройства, проанализированы различные методы анализа излучения (спектрометрия, флуориметрия, рефрактометрия). Разработаны рекомендации по выбору оптической принципиальной схемы устройства с учётом таких факторов, как необходимые технические условия работы прибора, габаритные размеры датчика, свойства анализируемого образца и необходимые результатов мониторинга проточного процесса.

Список литературы

1. DiFoggio R., Csutak S. Laser diode array downhole spectrometer. U.S. Patent No. 7782460.
2. Kamiya A., Miyashita M., Indo K. Method and apparatus for downhole spectral analysis of fluids. U.S. Patent No. 7379180.
3. Sroka S., Cartellieri A., Schaefer P. // Patent US20100025112A1. 2010.
4. Gui J.Y., Silva J.M., Carnahan J.C., Layer H.H. Online monitor for polymer processes. Patent US6635224B1. 2003.

С.М. КОСТРИЦКИЙ, А.В. ЯЦЕНКО¹, В.А. ФЕДОРОВ

НПК «Оптолинк», Зеленоград

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

ВЛИЯНИЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА РАБОТУ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Измерено пирозлектрического напряжение, появляющееся у интегрально-оптических элементов, изготовленных на чипах X-среза кристаллов LiNbO₃. Установлено, что этот пирозлектрический отклик пропорционален скорости изменения температуры и вызывает паразитный фазовый сдвиг.

S.M. KOSTRITSKII, A.V. YATSENKO¹, V.A. FEDOROV

Optolink Ltd, Zelenograd

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

INFLUENCE OF PYROELECTRIC EFFECT ON PERFORMANCE OF MULTIFUNCTION INTEGRATED-OPTICAL CHIP

The pyroelectric response of integrated-optical chips was studied for x-cut LiNbO₃. It was established, that pyroelectric voltage is proportional to the temperature change rate and is able to induce a parasitic phase shift.

Многофункциональный интегрально-оптический элемент (МИОЭ) ключевой элемент волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) средней и высокой точности [1]. Исследованный нами МИОЭ состоит из линейного поляризатора, Y-разветвителя и двух электрооптических фазовых модуляторов, выполненных на основе канальных волноводов в чипах X-среза кристаллов ниобата лития [2]. Кристалл ниобата лития (НЛ) обладает пирозлектрическим эффектом, поэтому быстрое изменение температуры вызывает появление большого электрического поля (0,5 кВ/см при изменении температуры на 1 К) из-за долгого времени характерного для релаксации и компенсации пирозлектрических зарядов на полярных торцах (Z-срез) чипов [2, 3]. Поэтому целью работы является экспериментальное исследование влияния пирозлектрического эффекта и на работу МИОЭ и поиск путей уменьшения этого влияния.

Для измерения пирозлектрического отклика МИОЭ его гермовыводы подключались к входу электрометра. Внутри корпуса МИОЭ гермовыводы соединены с Au/Cr-электродами фазовых модуляторов, которые

копланарны с протонообменными волноводами на X поверхности чипов LiNbO_3 , рис. 1. Одновременно с этим измерялась мощность оптического излучения (1530 - 1560 нм) прошедшего МИОЭ.

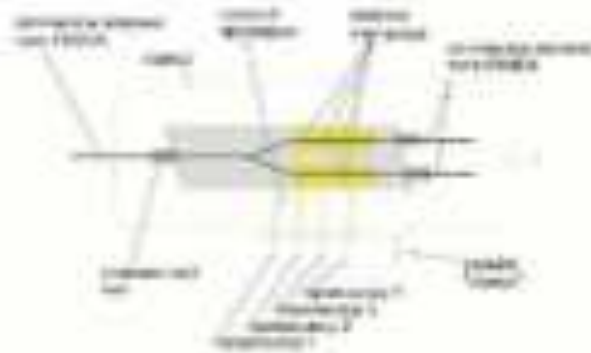


Рис. 1. Принципиальная схема МИОЭ: чёрные линии в чипе – волноводы

Две компоненты пирозлектрического отклика наблюдаются при изменениях температуры: 1 – медленно меняющаяся компонента; 2 – мощные короткие ($\approx 0,08 \div 0,11$ мс) импульсы [2]. Установлено, что амплитуды обоих компонент и частота появления импульсов пропорциональны скорости изменения температуры V , а при быстром и значительном изменении температуры ($V \geq 4$ К/мин.) они коррелируют с увеличением оптических потерь МИОЭ, как при нагревании так и при охлаждении. Отметим, что при использовании МИОЭ в составе ВОГ имеет смысл измерять не сам пирозлектрический эффект, а результирующее воздействие, которое оказывает пирозлектрический эффект на работу прибора, а именно дополнительный сдвиг фазы, наведённый эффектом [3]. Нами установлено, что величина такого паразитного сдвига фазы достигает $\pi/10$ даже при сравнительно небольшом ($\Delta T = 8$ К), но быстром изменении температуры, характерном для реальных применений ВОГ [1]. Установлено, что эти проявления пирозлектрического эффекта могут быть значительно уменьшены, как нанесением дополнительных электродов на поверхность чипа МИОЭ [2], так и изменением топологии Y-разветвителя МИОЭ.

Список литературы

1. Ran B., et al. // Opt. Eng. 2019. V. 58. P. 067104.
2. Kostritskii S.M., et al. // Ferroelectrics. 2021. V. 574. P. 171.
3. Gampp L.L., et al. // US patent 6128424. 2000.

В.М. ПЕТРОВ, Д.В. СЕМИСАЛОВ, Д.С. ХЛУСЕВИЧ,
М.И. ЯКОВЛЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КВАНТОВОГО CNOT-ГЕЙТА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ МАХА-ЦЕНДЕРА

Составлен план разработки интегрально-оптического квантового CNOT-гейта и обозначены условия проведения эксперимента. Целью работы является достижение результатов, превосходящих аналогичные работы.

V.M. PETROV, D.V. SEMISALOV, D.S. KHLUSEVICH,
M.I. YAKOVLEV

ITMO University, Saint-Petersburg

DEVELOPMENT AND CREATION OF A QUANTUM CNOT GATE BASED ON INTEGRATED OPTICAL MACH-ZENDLER INTERFEROMETERS

A plan for the development of an integrated optical quantum CNOT gate was drawn up and the conditions for the experiment were indicated. The aim of the work is to achieve results that are superior to similar researches.

Для изготовления интегрально-оптического чипа используется ниобат лития и технология диффузии титана. Интегральный чип, изготовленный по технологии диффузии титана в ниобате лития, имеет высокую стойкость к внешним воздействиям и может прослужить долго. Технология изготовления такого чипа хорошо отработана и используется в массовом производстве. Ниобат лития имеет широкое окно прозрачности: 0.25 - 5.3 мкм, а также обладает большими значениями электрооптических коэффициентов, что позволяет обеспечить низкое значение полуволнового напряжения [1 - 9].

Измерения работоспособности интегрально-оптического чипа (рис. 1) будут проходить по схеме томографии состояний. В результате экспериментов мы измерим вероятность срабатывания CNOT-гейта и построим таблицу истинности (рис. 2), а также оценим оптические свойства чипа на длине волны 810 нм.

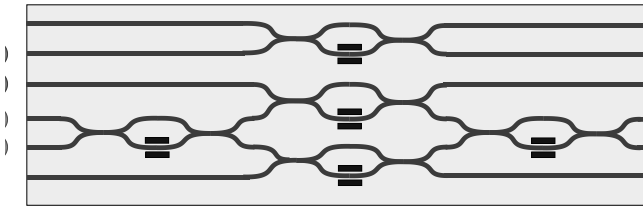


Рис. 1. Интегрально-оптический CNOT-гейт

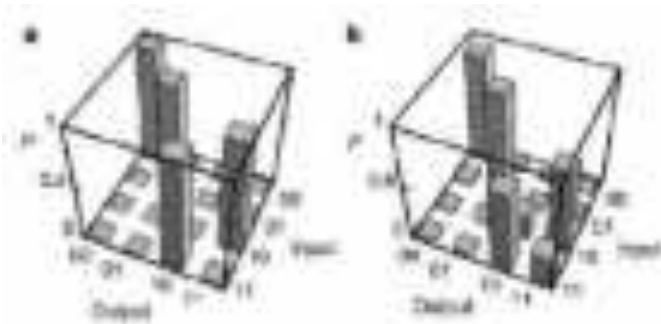


Рис. 2. Пример таблицы истинности

Список литературы

1. Alibart O., D'Auria, et al. Quantum photonics at telecom wavelengths based on lithium niobate waveguides // *Journal of Optics*. 2016. V. 18. No. 10.
2. Smith B.J., Kundys D., et al. Phase-controlled integrated photonic quantum circuits // *Optics Express*. 2009. V. 17. P. 13516-13525.
3. Zeuner J., Sharma A.N., et al. Integrated-optics heralded controlled-NOT gate for polarization-encoded qubits // *Quantum Inf.* 2018. V. 4. P. 13.
4. Zhang Q., Li M., et al. Femtosecond laser direct writing of an integrated path-encoded CNOT quantum gate // *Opt. Mater. Express*. 2019. V. 9. P. 2318-2326.
5. Li M., Zhang Q., et al. Femtosecond laser direct writing of integrated photonic quantum chips for generating path-encoded bell states // *Micromachines (Basel)*. 2020. V. 11 (12). P. 1111.
6. Crespi A., Ramponi R., Osellame R., et al. Integrated photonic quantum gates for polarization qubits // *Nat Commun*. 2011. V. 2. P. 566.
7. Martin A., Alibart O., De Micheli M.P., Ostrowsky D.B., Tanzilli S. A quantum relay chip based on telecommunication integrated optics technology // *New Journal of Physics*. 2011. V. 14.
8. Ralph T., Langford N., Bell T., White A. Linear optical controlled-NOT gate in the coincidence basis // *Physical Review A*. 2002. V. 65.
9. O'Brien J., Pryde G., White A., et al. Demonstration of an all-optical quantum controlled-NOT gate // *Nature*. 2003. V. 426. P. 264-267.

М.М. ВЕКШИН, О.А. КУЛИШ, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕННЫХ ОТВЕТВИТЕЛЕЙ В СТЕКЛЕ ДЛЯ КВАНТОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведена разработка интегрально-оптических направленных ответвителей в стекле с заданным коэффициентом деления мощности. Ответвители основаны на заглоблённых ионообменных волноводах в стекле.

M.M. VEKSHIN, O.A. CULISH, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

DESIGN OF INTEGRATED-OPTIC DIRECTIONAL COUPLERS IN GLASS FOR QUANTUM LOGIC ELEMENTS

The design of integrated-optic directional couplers in glass has been made with definite coupling ratio. Couplers are based on buried ion-exchange waveguides in glass.

Большие перспективы имеют разработки в области создания новой элементной базы для систем оптической квантовой обработки информации, использующих интегрально-оптические схемы. Цель работы состоит в расчёте одного из базовых элементов квантовой фотоники – интегрально-оптического направленного ответвителя. В работе рассматривается ответвитель, формируемый методом ионного обмена в стекле с последующим электростимулированным заглоблением канала.

Направленный ответвитель используется в квантовой фотонике как аналог светоделительной пластины. Общие требования, предъявляемые к элементам направленной связи, состоят в необходимости обеспечения: точного коэффициента деления ответвителя (в частности, для квантового логического элемента CNOT используются коэффициенты деления $1/2$ и $1/3$ [1]), одномодового режима с низкими потерями, стабильности поляризации направленных волн, и как следствие, высокой классической и квантовой видности интерференции. Также требуется эффективное соединение схемы на основе ответвителей с волоконными световодами.

Проведена разработка схем интегрально-оптических направленных ответвителей с различным коэффициентом деления мощности. Для построения ответвителей необходимо учитывать направленную связь и в

S-изгибах. Геометрические параметры направленного ответвителя показаны на рис. 1а. Параметр W обозначает ширину щели в маске для проведения ионного обмена. Параметры для расчётов соответствуют указанной выше технологии изготовления в стекле К-8 путём ионного обмена Ag^+-Na^+ . Как один из результатов расчётов, длина связи L_0 для 3 дБ деления мощности составляет 1750 мкм для расстояния между каналами $d = 15$ мкм на длине волны 1.55 мкм.

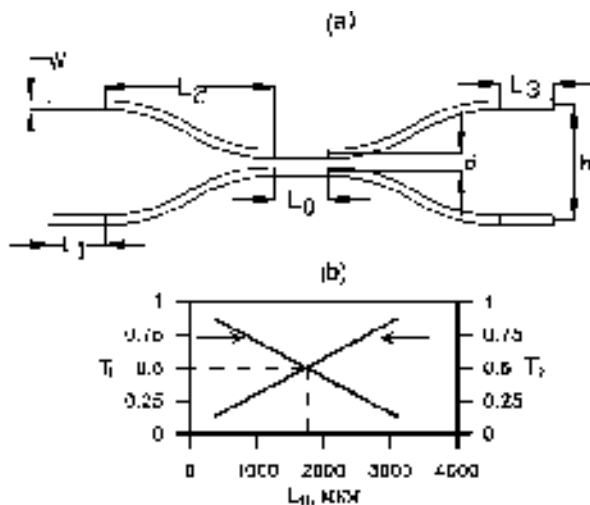


Рис. 1. Схема волноводного направленного ответвителя с применением S-изгибов (а); зависимость коэффициентов передачи мощности в выходные каналы T_1 и T_2 от длины связи в центральной области L_0 (b)

На рис. 1b приведена зависимость коэффициентов передачи мощности в выходные каналы T_1 и T_2 от длины связи в центральной области L_0 . По данной зависимости можно выбирать необходимую длину связи направленного ответвителя с требуемым коэффициентом деления мощности между выходными портами схемы.

Таким образом, проведена разработка волноводных элементов направленной связи в стекле на длине волны 1550 нм.

Список литературы

1. Zhang Q, Li M., Chen Y., Ren X.-F., Osellame R., Gong Q., Li Y. Femtosecond laser direct writing of an integrated path-encoded CNOT quantum gate // Optical Materials Express. 2019. V. 9. No. 5. P. 2318-2326.

Р.З. ИБРАГИМОВ

*Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики,
Новосибирск*

СИНХРОНИЗАЦИЯ ОПОРНОГО ГЕТЕРОДИНА В КОГЕРЕНТНОМ ОПТИЧЕСКОМ ПРИЁМНИКЕ С МНОГОУРОВНЕВЫМ ФОРМАТОМ МОДУЛЯЦИИ

Представлена схема интерполятора для оценки ошибки при работе опорного оптического гетеродина. В работе предлагается реализовать подбор коэффициентов интерполятора с помощью многочлена Лагранжа.

R.Z. IBRAGIMOV

Siberian State University of Telecommunications and Information Science, Novosibirsk

SYNCHRONIZATION OF HOMODYNE HETERODYNE IN A COHERENT OPTICAL RECEIVER WITH ADVANCED FORMAT MODULATION

The scheme of the interpolator for estimating the error in the operation of the reference optical heterodyne is presented. The paper proposes to implement the selection of the interpolator coefficients with the help of the Lagrange polynomial.

Узкополосные оптические лазерные гетеродины нашли своё применение в приёмной части когерентных транспондеров. За счёт высокостабильного излучения обеспечивается подмешивание опорного сигнала в принимаемый оптический сигнал с многоуровневым форматом модуляции. Такой метод приема позволяет обеспечить стабильность кодовых состояний многоуровневых форматов модуляции [1, 2].

Важность обеспечения тактовой синхронизации возрастает с увеличением скорости полезного оптического сигнала, так как уменьшается расстояние между фазовыми состояниями при модуляции DP-16QAM, DP-32QAM и выше [3, 4].

Целью работы является исследование методов обеспечения тактовой синхронизации и оценки смещения между тактовой частотой принимаемого сигнала и хронизирующей частотой блока цифровой обработки сигнала.

Наиболее простым методом компенсации данного сдвига является использование корректоров, но в виду ухудшения его сходимости был использован интерполятор [5]. Анализ показывает, что в случае

использования цифровой интерполяции сигнала, частота дискретизации может быть уменьшена.

Интерполятор третьего порядка (рис. 1) даёт возможность снизить величину разбега между тактовой частотой приёмника и оптического сигнала. Для оценки требуемого сигнала в момент времени, отсчёт $y(k)$ будет определяться не только весовыми коэффициентами, но и величиной ошибки $\xi(k)$, которая может использоваться для обновления текущего значения временного сдвига. Таким образом, перестраиваемый интерполятор реализует схему, при которой будет изменяться шаг интерполяции. Результаты работы показывают, что в качестве подбора коэффициентов интерполяции необходимо использовать многочлен Лагранжа с невысоким порядком, так как увеличения полинома не оказывает существенного влияния на величину ошибки.

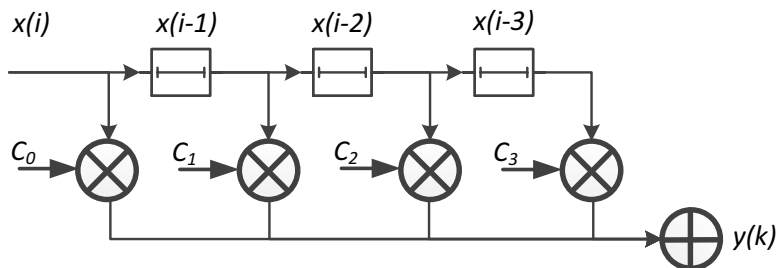


Рис. 1. Схема интерполятора третьего порядка

Список литературы

1. Macho A. Digital coherent receivers and advanced optical modulation formats in 100 and 200 Gb/s DWDM systems. Final work for the course Sistemas Avanzados de Comunicaciones, ETSIT-UPM, Madrid (Spain). 2014.
2. Maniloff E., Gareau S., Moyer M. 400G and beyond: Coherent evolution to high-capacity inter data center links // 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). 2019. P. 1-3.
3. Chang S.H., Chung H.S., Kim K. Digital non-data-aided symbol synchronization in optical coherent intradyne reception // Optics Express. 2008. V. 16. No. 19. P. 15097-15103.
4. Gardner F. A BPSK/QPSK timing-error detector for sampled receivers // IEEE Transactions on communications. 1986. V. 34. No. 5. P. 423-429.
5. Mueller K., Muller M. Timing recovery in digital synchronous data receivers // IEEE transactions on communications. 1976. V. 24. No. 5. P. 516-531.

И.В. БОГАЧКОВ

Омский государственный технический университет

**РАЗРАБОТКА ТЕСТИРУЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ
ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ**

В работе представлена тестирующая программа для контроля знаний студентов по телекоммуникационным системам по блоку дисциплин волоконно-оптического профиля.

I.V. BOGACHKOV

Omsk State Technical University

**DEVELOPMENT OF THE TESTING PROGRAM
FOR MONITORING STUDENTS' KNOWLEDGE
OF FIBER-OPTIC TELECOMMUNICATION SYSTEMS**

The paper presents a testing program for monitoring students' knowledge of telecommunication systems in the fiber-optic profile disciplines.

Важной частью учебного процесса является контроль знаний студентов [1]. Одним из эффективных вспомогательных средств являются тестирующие программы. При этом полезно было бы создать универсальную оболочку, которая позволяла бы по любым изучаемым дисциплинам загружать вопросы с поясняющими рисунками, задавать количество вопросов в тесте, а также выделять правильные ответы.

На рис. 1 представлен пример работы (копия экрана) разработанной тестирующей программы для контроля знаний студентов по волоконно-оптическим телекоммуникационным системам, на котором присутствует графический объект (рис. 1) [1].

Также есть окно вызова файла помощи и информации о программе (правый нижний угол). Для преподавателя есть специальная кнопка в правом верхнем углу, которая (по специальному входу с паролем) позволяет добавлять и корректировать данные.

Время на ответ целесообразно ограничить, поэтому в верхней части экрана есть счётчик времени, которое отводится на ответ. После завершения теста выводится количество вопросов и количество

правильных ответов. Возможно выйти из теста до его завершения по соответствующей кнопке. На рис. 2 приведён другой пример экрана работы тестирующей программы без графической части (рисунок), на котором выбран ответ [1].

Данная программа используется в учебном процессе ОмГТУ.



Рис. 1. Пример экрана работы тестирующей программы



Рис. 2. Пример экрана работы тестирующей программы

Список литературы

1. Богачков И.В., Горлов Н.И. Проектирование, строительство и техническая эксплуатация волоконно-оптических линий передачи: учебное пособие: в 5 ч. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013 - 2015.

Р.К. ГОНЧАРОВ, Е.А. БОЛЫЧЕВ, Н.А. ИВАНКОВ, К.А. СЕНИК
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ПОЛУОПРЕДЕЛЁННОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ В ПРИЛОЖЕНИИ К СИСТЕМАМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧА

Данная работа посвящена проблеме применения полуопределённого программирования в системах квантового распределения ключа (КРК). Представлены основные теоретические инструменты, в контексте задач полуопределённого программирования для оценки безопасности основных экспериментальных платформ, использующих протоколы на дискретных переменных и на непрерывных переменных.

R.K. GONCHAROV, E.A. BOLYCHEV, N.A. IVANKOV,
K.A. SENIK
ITMO University, Saint-Petersburg

SEMIDEFINITE PROGRAMMING IN APPLICATION TO QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEMS

This work is devoted to the problem of applying semidefinite programming in quantum key distribution (QKD) systems. The main theoretical tools are presented, in the context of semidefinite programming problems, that have been developed to assess the security of the main experimental platforms (discrete-variables and continuous-variable protocols).

На данный момент системы квантового распределения ключа (КРК), как правило, используют стандартный набор известных решений для постобработки сырой последовательности, коррекции ошибок и усиления стойкости. Однако в последнее время наблюдается рост интереса к разработке и адаптации программных методов, которые могут значительно повысить производительность систем КРК. Одним из таких является полуопределённое программирование.

Многие практические задачи исследования операций и комбинаторной оптимизации могут быть смоделированы или аппроксимированы как задачи полуопределённого программирования. В контексте КРК, средствами полуопределённого программирования может быть осуществлена оптимизация ключевых параметров системы, как следствие, уточнена длина конечного ключа для заданной реализации. Стратегия

состоит в выражении длины секретного ключа (или приведённой скорости генерации) в виде задачи выпуклой оптимизации, которая может быть решена численно [1, 2].

Методы полуопределённого программирования универсальны и могут быть использованы в контексте протоколов КРК как на дискретных, так и на непрерывных переменных (КРКНП) [2 - 4]. В частности, на рис. 1 приведён график зависимости скорости генерации секретного квантового ключа в пересчёте на посылку от длины квантового канала для протокола КРКНП с дискретным типом модуляции. Следует отметить, что для подобного протокола аналитическое решение поставленной задачи не может быть получено, так как для него не была подобрана оптимальная атака, а оптимальность известных атак не была доказана [1].

Решение вышеописанных задач позволит увеличить число сгенерированных ключей в единицу времени при том же числе задействованных волоконно-оптических линий связи при интеграции систем КРК в реальную инфраструктуру благодаря программной оптимизации существующих аппаратных реализаций.

В настоящее время исследования в области активно развиваются и существуют попытки использования уже в реальных системах КРК [5 - 7].

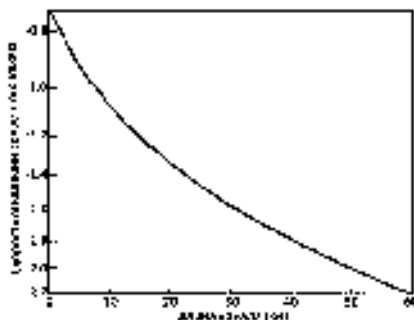


Рис. 1. График зависимости скорости генерации секретного ключа (бит/символ) от длины канала (км) для системы КРКНП с дискретной модуляцией

Список литературы

1. George I., Lin J., Lütkenhaus N. // Phys. Rev. Res. 2021. V. 3. No. 1. P. 013274.
2. Bunandar D., et al. // Quantum Inf. 2020. V. 6. No. 1. P. 1-12.
3. Ghorai S., et al. // Phys. Rev. X. 2019. V. 9. No. 2. P. 021059.
4. Lin J., Upadhyaya T., Lütkenhaus N. // Physical Review X. 2019. V. 9. No. 4. P. 041064.
5. Pan Y., et al. // Phys. Rev. A. 2010. V. 82. No. 2. P. 022317.
6. Lin N.I., et al. // Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. P. 1-15.
7. Roumestan F., et al. // arXiv preprint arXiv:2207.11702. 2022.

Д.В. БОЛОТОВ, К.Ю. ЕРОХИН, С.Ю. КАЗАНЦЕВ,
О.В. КОЛЕСНИКОВ, С.Н. КУЗНЕЦОВ¹

*Московский технический университет связи и информатики
¹АО «МОСТКОМ», Рязань*

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НОК EMQOS 1.0 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЕ

Представлены результаты исследований модульной установки, созданной на основе сопряжения терминалов атмосферной оптической связи компании АО «МОСТКОМ» и научно-образовательного комплекса НОК EMQOS 1.0, предназначенного для исследований в области квантовой оптики и технологии квантового распределения ключей в волоконно-оптических линиях связи. Продемонстрирована принципиальная возможность применения двухпроходной схемы, реализованной в НОК EMQOS 1.0, для передачи квантового ключа в свободной атмосфере за счёт сопряжения с терминалами атмосферной связи, а также выявлены узлы НОК, требующие доработки и модернизации для применения в составе атмосферных линий связи.

D.V. BOLOTOV, K. Yu. EROKHIN, S. Yu. KAZANTSEV,
O.V. KOLESNIKOV, S.N. KUZNETSOV¹

*Moscow Technical University of Communications and Informatics
¹JSC MOSTCOM, Ryazan*

POSSIBILITIES OF APPLICATION OF EMQOS 1.0 FOR INVESTIGATION OF QUANTUM DISTRIBUTION TECHNOLOGY IN A FREE SPACE

The results of studies of a modular installation created on the basis of interfacing atmospheric optical communication terminals of JSC MOSTCOM and the EMQOS 1.0 scientific and educational complex, designed for research in the field of quantum optics and quantum key distribution technology in fiber-optic communication lines, are presented. The fundamental possibility of using a two-pass scheme implemented in EMQOS 1.0 for transmitting a quantum key in a free atmosphere by interfacing with atmospheric communication terminals is demonstrated, and nodes that require refinement and modernization for use as part of atmospheric communication lines are identified.

В настоящее время актуальной задачей является создание отечественных систем квантового распределения ключей (КРК) и

подготовка инженерных кадров в области квантовой связи. В России сейчас есть несколько фирм реализующие промышленные и учебные системы квантового распределения ключей в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС). Для реализации технологии КРК в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС) в работе [1] была показана возможность модульного подхода, включающая совместное использование серийных терминалов АОЛС [2] и блоков КРК для ВОЛС [3]. В результате исследований [1] были также выявлены проблемы, возникающие при сопряжении устройств, предназначенных для передачи сигналов в разных средах, в частности, это – необходимость доработки систем синхронизации и интеллектуальной настройки, реализованной в промышленных блоках КРК [3], чтобы эти блоки могли работать на АОЛС. В работе [4] при исследовании оптических потерь в квантовом канале и информационном каналах связи, реализованных в терминалах АОЛС, была также выявлена проблема сопряжения терминалов АОЛС с блоками КРК, после модернизации [5], данная проблема была устранена, что позволило продолжить эксперименты по передаче квантового ключа, используя терминалы АОЛС. Поскольку модернизация системы синхронизации промышленных блоков КРК представляет известные проблемы, эксперименты было решено продолжить с использованием научно-образовательного комплекса EMQOS 1.0 (НОК) российской фирмы QRate [6]. Целью работ была проверка возможности реализации КРК в свободной атмосфере на основе НОК, изучение условий прохождения информации в квантовом канале при разных погодных условиях, а также разработка учебно-исследовательского стенда для изучения КРК в гибридных каналах связи. В докладе представлена схема стенда, зависимости потерь в квантовом канале и QBER, полученные на атмосферной трассе 200 м при погодных условиях.

Список литературы

1. Боев А.А. и др. // Письма в ЖТФ, 2022. Т. 48. Вып. 15. С. 15-18.
2. Боев А.А. и др. // Вестник РГТУ. 2017. № 62. С. 44-48.
3. Киктенко Е.О. и др. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 9. С. 798-802.
4. Bolotov D.V., et al. // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. P. 1-5.
5. Керносов И.Ю., Кузнецов С.Н. // Лазерно-информационные технологии: Труды XXX Международной научной конференции. 2022. С. 68-69.
6. Rodimin V., et al. // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2019 Proceedings. Tomsk, 2019. P. 8729637.

А.А. САНТЬЕВ, В.И. ЕГОРОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКАЯ КВАНТОВАЯ СЕТЬ ДЛЯ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ НА БОКОВЫХ ЧАСТОТАХ

Разработана архитектура многопользовательской квантовой сети для интернета вещей на основе систем квантового распределения ключей на боковых частотах. При проектировании учтены особенности классических телекоммуникационных сетей городского масштаба и преимущества систем квантового распределения ключей на боковых частотах. Проведена экспериментальная апробация основных технических решений, лежащих в основе разрабатываемой архитектуры многопользовательской квантовой сети.

A.A. SANTEV, V.I. EGOROV
ITMO University, Saint-Petersburg

MULTI-USER QUANTUM NETWORK FOR THE INTERNET OF THINGS BASED ON SUBCARRIER WAVE QUANTUM KEY DISTRIBUTION SYSTEM

The architecture of a multiuser quantum network for the internet of things based on subcarrier wave quantum key distribution systems has been developed. The design considers the features of classical urban-scale telecommunication networks and the advantages of subcarrier wave quantum key distribution systems. An experimental testing of the main technical solutions underlying the developed architecture of a multiuser quantum network has been carried out.

В настоящее время актуальность вопроса информационной безопасности общепризнана и определяется трендом развития криптографически стойких систем и сетей передачи информации. Технологию квантового распределения ключа (КРК) рассматривают как наиболее перспективную технологию защиты информации [1].

Основной проблемой при внедрении систем КРК в системы интернета вещей (ИВ) является невозможность обеспечения одновременной многопользовательской рассылки квантовых состояний для формирования независимых квантовых ключей с одного модуля КРК, поскольку трафик в системах ИВ часто является многоадресным.

В настоящей работе предлагается использовать высокую спектральную эффективность систем квантовой рассылки ключей на боковых частотах модулированного излучения (КРКБЧ) [2], а именно возможность передавать несколько квантовых каналов в рамках одного DWDM канала. Для организации разделения квантовых каналов между находящимися в одной сети доступа модулями Получателя системы КРКБЧ предлагается использовать представленную на рис. 1 схему. Для получения двух независимых квантовых каналов на различных парах боковых частот предлагается подавать два радиочастотных сигнала на фазовый модулятор с использованием сумматора мощности Уилкинсона. Дополнительно предлагается отрезать «левые» боковые частоты для компенсации негативного влияния хроматической дисперсии, как это предлагается в [3]. Впоследствии предлагается использование узкополосного отражающего спектрального фильтра для разделения двух боковых частот и несущей частоты между различными абонентами.

Экспериментальная апробация схемы заключалась в демонстрации возможности фильтрации одной боковой частоты и половины мощности излучения на несущей частоте при длине волны излучения 1550,13 нм, частоте одного модулирующего сигнала 3 ГГц и амплитуде 132 мВ, мощности излучения на несущей частоте 3,61 дБм, мощности излучения на боковых частотах – 37,02 дБм.

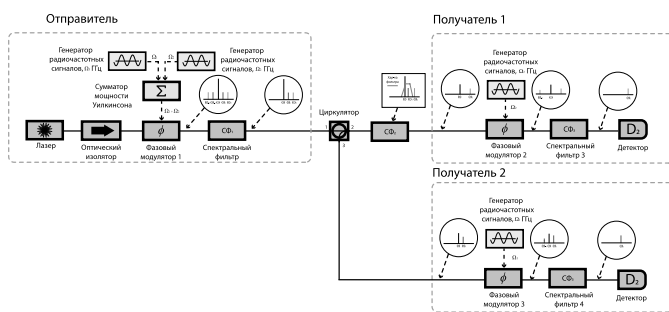


Рис. 1. Система КРКБЧ для многопользовательской квантовой сети

Список литературы

1. Sasaki M. Quantum key distribution and its applications // IEEE Secur. Priv. 2018. V. 16. P. 42-48.
2. Gleim A.V., et al. Secure polarization-independent subcarrier quantum key distribution in optical fiber channel using BB84 protocol with a strong reference // Opt. Express. 2016. V. 24. No. 3. P. 2619-2633.
3. Kiselev F., et al. Analysis of the chromatic dispersion effect on the subcarrier wave QKD system // Opt. Express. 2020. V. 28. No. 19. P. 28696-28712.

А.В. БАХУС¹, М.В. БОЛТАНСКИЙ², Н.С. ТРОФИМОВ^{1,3},
Р.А. ШАХОВОЙ^{1,3}

¹Московский технический университет связи и информатики

²Российский университет дружбы народов, Москва

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва

РЕАЛИЗАЦИЯ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

В работе представлен пример реализации квантового генератора случайных чисел на основе рандомизации фазы при генерации лазерных импульсов.

A.V. BAHUS¹, M.V. BOLTANSKI², N.S. TROFIMOV^{1,3},
R.A. SHAKHOVOY^{1,3}

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics

²Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow

REALIZATION OF A QUANTUM RANDOM NUMBER GENERATOR

The paper presents an example of the realization of a quantum random number generator based on phase randomization in the generation of laser pulses.

В криптографии существуют задачи генерации ключа. От этого зависит криптостойкость системы, поэтому к генераторам случайных чисел выдвигаются требования в подлинности случайности.

Существуют генераторы, работа которых основывается на математических алгоритмах, но их генерируемая последовательность является псевдослучайной [1]. У квантовых генераторов случайных чисел (КГСЧ) этого недостатка нет.

Существуют разные способы создания КГСЧ, например, работающие в однофотонном режиме [2]. Используемая нами схема (рис. 1) использует лазерные импульсы. При работе полупроводникового лазера в режиме переключения усиления каждый новый импульс появляется со случайной фазой, поэтому, результат интерференции соседних импульсов будет случайной величиной, причём случайность в данном случае будет иметь квантовое происхождение [3].

В представленной схеме из-за точно подобранной разности длин двух плеч несбалансированного интерферометра Майкельсона, первый и второй импульсы интерферируют. Так как они когерентны и имеют случайную разность фаз, после интерференции мы получаем результат на детекторе в виде случайной амплитуды напряжения.

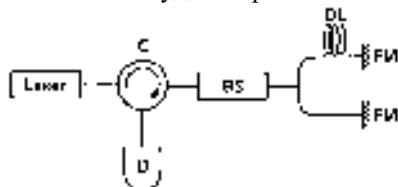


Рис. 1. Схема квантового генератора случайных чисел: C – циркулятор, D – детектор, BS – светоделитель, DL – линия задержки, FM – зеркало Фарадея

По полученным данным можно построить гистограмму (рис. 2), которая будет описывать плотность вероятности генерации определённых значений.

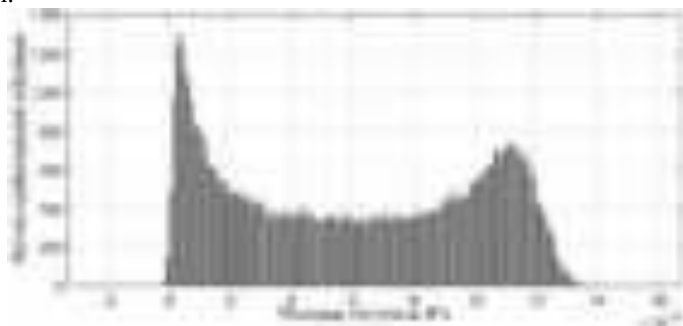


Рис. 2. Распределение вероятности генерации значений

Для оцифровки сигнала, выходящего из фотоприёмника, можно использовать компаратор, который будет сравнивать амплитуды интерференционных импульсов с пороговым напряжением, которое можно определить из анализа гистограммы, показанной на рис. 2.

Список литературы

1. Pivoluska M., Plesch M. Device independent random number generation // Acta Physica Slovaca. 2014. V. 64. No. 6.
2. Ma X., Yuan X., Cao Z., Qi B., Zhang Z. Quantum random number generators // Quantum information. 2016. P. 16021.
3. Herrero-Collantes M. Quantum random number generators // Reviews of modern physics. 2017.

М.В. БОЛТАНСКИЙ, А.В. БАХУС¹, Р.А. ШАХОВОЙ^{1,2},
Н.С. ТРОФИМОВ^{1,2}, Т.К. ЧЕХЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва

¹*Московский технический университет связи и информатики*

²*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

ПОСТОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ КВАНТОВОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

В работе представлен процесс оцифровки и обработки данных, полученных со схемы квантового генератора случайных чисел. Описаны методы перевода выходных данных в бинарную строку, анализ результатов и процесс извлечения истинной случайности.

M. V. BOLTANSKIИ, A. V. BAHUS¹, R. A. SHAKHOVOY^{1,2},
N. S. TROFIMOV^{1,2}, T. K. CHECKHLOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

¹*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

²*National University of Science and Technology MISiS, Moscow*

POST-PROCESSING AND ANALYSIS OF THE OUTPUT DATA OF A QUANTUM RANDOM NUMBER GENERATOR

The paper presents the process of digitization and processing of data obtained from the scheme of a quantum random number generator. Methods of translating output data into a binary string, analysis of results and the process of extracting true randomness are described.

Не каждый алгоритм, выдающий якобы случайные числа, выдает истинно случайный результат. Даже если по графику распределения кажется, что оно случайно, на деле в нем присутствуют корреляции. Для анализа мы использовали пакет статистических тестов NIST STS [1]. Даже в последовательность от технически качественного генератора будут вносить вклад классические шумы, а значит на неё может влиять злоумышленник, саботируя выходную последовательность. Устранить вклад классических шумов призваны экстракторы случайности [2], задача которых состоит в корректировке вклада классического шума в работу генератора, оставляя в его последовательности только гарантировано случайные значения. Популярным решением является экстрактор

Тревизана, работоспособность которого уже была продемонстрирована [3]. Но в нашей работе мы используем экстрактор на матрицах Теплица [4], как более быстрый и эффективный способ. На рис. 1 - 3 представлен пример получаемых экспериментальных данных, их первичная обработка и график корреляции, показывающий отсутствие предсказуемых тенденций в полученных значениях:

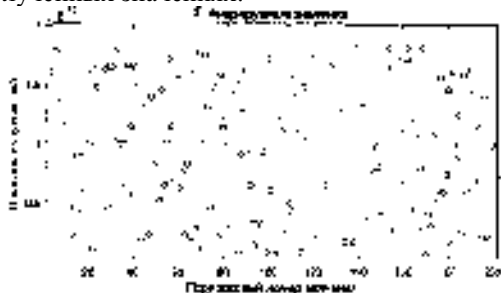


Рис. 1. Выходные данные КГСЧ

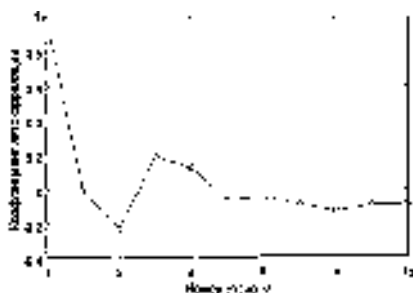


Рис. 2. Автокорреляции данных



Рис. 3. Полная схема реализации системы КГСЧ

Список литературы

1. УДК 681.3.06. Статистическое тестирование генераторов случайных и псевдослучайных чисел с использованием набора статистических тестов NIST STS.
2. Nisan N., Ta-Shma A. Extracting Randomness: A Survey and New Constructions // Journal of Computer and System Sciences. 1999. V. 58. P. 148-173.
3. Ma X., Xu F., Xu H., Tan H., Qi B., Lo H.-K. Post-processing for quantum random-number generators: Entropy evaluation and randomness extraction // Phys. Rev. A. 2013. V. 87. P. 062327.
4. Zhang X., Nie Y.-Q., Liang H., Zhang J. FPGA Implementation of Toeplitz hashing extractor for real time post-processing of raw random numbers // Proc. IEEE-NPSS RT Conf. 2016.

И.О. ВОРОНЦОВА, Р.К. ГОНЧАРОВ, Д.В. ТУПЯКОВ,
Ф.Д. КИСЕЛЕВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ КВАНТОВОГО ПОВТОРИТЕЛЯ НА КОГЕРЕНТНЫХ СОСТОЯНИЯХ

Приведено описание подхода к реализации численной модели квантового повторителя, работающего с состояниями Шредингеровского кота с учётом эффективности квантовой памяти, потерь в канале и прочих неидеальностей системы. Проведена предварительная оценка производительности с выявлением зависимостей вероятности срабатывания детектора с различением числа фотонов от параметров системы, в частности от амплитуды исходного состояния Шредингеровского кота.

I.O. VORONTSOVA, R.K. GONCHAROV, D.V. TUPYAKOV,
F.D. KISELEV

ITMO University, Saint-Petersburg

NUMERICAL SIMULATION OF A QUANTUM REPEATER SCHEME EMPLOYING COHERENT STATES

A description of an approach to the implementation of a quantum repeater numerical model is given for a system operating with Schrödinger cat states. The model considers the efficiency of quantum memory, channel losses, and other decoherence effects on the system. A preliminary estimation of the system performance is carried out, providing the dependences of the probability of a photon number resolving detector (PNRD) clicks on system parameters, particularly, the amplitude of the initial Schrödinger cat state.

Состояния Шредингеровского кота представляют собой симметричную (чётные) или антисимметричную (нечётные) суперпозицию когерентных состояний [1]. В настоящий момент построены аналитические модели, описывающие явление декогеренции для таких состояний в контексте квантовых повторителей, однако численными методами работа квантовых повторителей с учётом эффектов декогеренции описана не была.

Целью работы является поэтапное решение задачи численного анализа и оценки производительности квантового повторителя в линдбладовской динамике с учётом волоконного квантового канала через рассмотрение составных частей системы и, соответственно, их математического представления для элементарного звена квантового повторителя.

Его схема представлена на рис. 1, где в простейшем случае задействованы две ячейки квантовой памяти (QM), детекторы с разрешением числа фотонов (D_1 и D_2) и светоделители (BS). На обеих сторонах генерируются состояния-коты (чётные), одна часть которых сохраняется в ячейке памяти, а другая передается через канал на объединяющий светоделитель 50/50. Дальнейшее детектирование результирующего состояния в контексте работы характеризуется вероятностью детектирования m фотонов [2]:

$$p_{\eta}(m) = \text{Tr} \left[\rho : \frac{(\eta a^{\dagger} a)^m}{m!} \exp(-\eta a^{\dagger} a) : \right] = \sum_{n=m}^{\infty} \rho_{nn} \binom{n}{m} \eta^m (1 - \eta)^{n-m},$$

где a (a^{\dagger}) – бозоновский оператор уничтожения (рождения), ρ – матрица плотности измеряемого состояния, η – эффективность детектора, а нотация $: \dots :$ соответствует нормальному порядку операторов.

Обнаружение одиночного фотона на центральной измерительной станции «предсказывает» сохранение в памяти запутанного когерентного состояния. Рассмотренная вероятность p_{η} есть сумма вероятностей детектирования чётного p_{even} , нечётного p_{odd} и вакуумного p_{zero} состояний. Полученное распределение вероятности можно анализировать в контексте различных параметров системы, в частности – амплитуды $|\alpha|^2$ исходного состояния кота Шредингера (рис. 2). Видно, что при увеличении последней вероятность p_{zero} уменьшается и, соответственно, увеличивается вероятность разрешения чётных и нечётных состояний p_{even} и p_{odd} , что свидетельствует о меньшей подверженности явлениям декогеренции состояний с большей амплитудой.

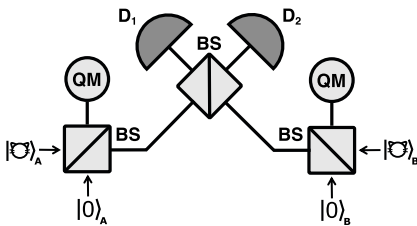


Рис. 1. Схема элементарного звена квантового повторителя

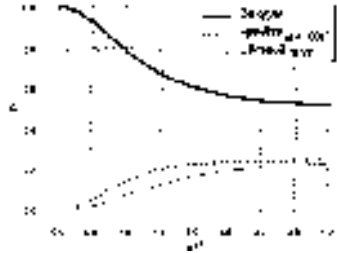


Рис. 2. Зависимость вероятностей детектирования от амплитуды начального состояния

Список литературы

1. Dodonov V.V., Malkin I.A., Man'ko V.I. // Physica. 1974. V. 72 (3). P. 597-615.
2. Dall'Arno M., D'Ariano G.M., Sacchi M.F. // Phys. Rev. A. 2010. V. 82 (4). P. 042315.

Д.Н. ГОМОНОВ, К.В. СОБОЛЕВ

Южный федеральный университет, Таганрог

КОНЦЕПЦИЯ ГОРОДСКОЙ ЗАЩИЩЁННОЙ ПАССИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

В работе описана концепция защищённой телекоммуникационной сети, в основе которой используется технология пассивных оптических сетей. Технология пассивных оптических сетей была разработана для максимально эффективного и экономного использования возможностей оптоволоконной сети. Организация подключения нескольких десятков абонентов к сети по одному оптоволокну — это основное преимущество пассивных оптических сетей. Это реализовано с помощью разделения передачи пакетов во времени, а также разделения приема и передачи данных в разных волновых диапазонах.

D.N. GOMONOV, K.V. SOBOLEV

Southern Federal University, Taganrog

THE CONCEPT OF AN URBAN PROTECTED PASSIVE OPTICAL NETWORK

The paper describes the concept of a secure telecommunications network based on the technology of passive optical networks. The technology of passive optical networks has been developed for the most efficient and economical use of the capabilities of the fiber optic network. The organization of connecting several dozen subscribers to the network via a single fiber is the main advantage of passive optical networks. This is implemented by separating the transmission of packets in time, as well as separating the reception and transmission of data in different wave bands.

Выбор используемой технологии пассивной оптической сети – Time Wavelength Division Multiplexing passive optical network. На вышеупомянутый выбор повлиял ряд факторов. Были проанализированы следующие технологии: TWDM PON, FTTB и DWDM. Приоритетным критерием являлась экономическая составляющая. Так как в технологии FTTB для каждого абонента необходимо отдельное оптическое волокно, к тому же со стороны провайдера устанавливается больше активного оборудования, чем, к примеру, при технологии PON. Вывод таков, что FTTB не подходит, так как является более финансово-затратной технологией, PON, а также по комфортабельности обслуживания активных элементов, вследствие большего числа их единиц, в отличие от PON.

В случае сравнения DWDM с вышеупомянутыми технологиями, надо обязательно понимать, что данная технология является магистральной, то есть основное её преимущество заключается в относительно больших расстояниях и скорости, а в данном случае речь ведется про городскую среду, а именно расстояние до 5 км. Соответственно, по финансовому критерию DWDM также уступает PON [1].

Технология TWDM PON является расширением технологии GPON. Благодаря технологии WDM (возможность выбора конкретным абонентом) в одном сигнале можно передавать не менее четырёх разных длин волн. За счёт технологии TDMA каждый из каналов может одновременно обслуживать несколько абонентов на одной длине волны. Каждый абонентский терминал в сети оснащён настраиваемым трансивером, который селективно передаёт или принимает потоки данных на паре длин волн для нисходящего и восходящего потоков соответственно.

В итоге, данная технология позволяет добиться общей пропускной способности сети 40 Гбит/с по нисходящему потоку (для четырёх длин волн) и 10 Гбит/с по восходящему потоку, а в перспективе возможно использование восьми длин волн с суммарной скоростью передачи 80 Гбит/с. В данной технологии (TWDM PON) происходит шифрование нисходящего потока, с применением безопасного усовершенствованного стандарта шифрования (AES) [2]. Обеспечивается создание и функционирование зашифрованных двунаправленных туннелей с использованием отечественных разработок, а именно алгоритма шифрования «Кузнечик» и криптошлюзов «Застава».

Чтобы осуществлять защиту физического рода, применяются мониторинговая система (автоматизированная) ONMS. Она представляет системное администрирование сетями состоящих их волоконной оптики. В свою очередь ONMS гарантирует тестирование принадлежности передающей системы, за счёт метода рефлектометрии.

Работа выполнена при поддержке ИКТИБ ЮФУ.

Список литературы

1. Tarasov A.E. PON technology as a method of data transmission. 2021. V. 23. P. 509.
2. Gorbunov A., Zachinyayev Yu., Pljonkin A. Design of protected optical telecommunication systems. Publisher: Southern Federal University.

А.А. ПРОНИН, Н.В. ПЧЕЛКИНА, К.П. УСАЧЕВ, С.А. ЧИЖ
Московский технический университет связи и информатики

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНИМОСТИ КОММЕРЧЕСКИХ АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Проанализированы перспективы применения атмосферных оптических линий связи в коммерческих целях, включая возможности реализации технологии квантового распределения ключа в открытом пространстве. Представлены результаты сравнения с другими технологиями передачи данных, для различных условий эксплуатации проведены оценки экономической целесообразности использования терминалов атмосферной оптической связи.

А.А. PRONIN, N.V. PCHELKINA, K.P. USACHEV, S.A. CHIZH
¹Moscow Technical University of Communications and Informatics

PROSPECTS OF APPLICABILITY OF COMMERCIAL ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES

The prospects of application and development of atmospheric optical communication lines for commercial purposes, including the possibility of implementing quantum key distribution technology in open space, are considered. The results of comparison with other data transmission technologies are presented, possible advantages depending on different operating conditions are evaluated.

В настоящее время, кроме высокой скорости передачи информации, требуется обеспечить защиту данных, передаваемых по линиям связи. Для коммерческих и промышленных предприятий, находящихся в условиях плотной городской застройки и имеющих территориально распределённую инфраструктуру, когда прокладка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) технически невозможна или экономически нецелесообразна, эффективным решением развития телекоммуникационных систем являются беспроводные сети связи. Одной из таких технологий является – атмосферная оптическая передача данных. Значительные достижения в области технологий приёма-передачи оптического излучения существенно повлияли на рост интереса к коммерческим атмосферным оптическим линиям связи (АОЛС), в том числе защищённых по технологии квантового распределения ключей (КРК) [1, 2].

Нами был проведён сравнительный анализ актуальных технико-экономических характеристик терминалов АОЛС с другими технологиями связи. Оценивались: ориентировочная стоимость, сроки организации линии связи (время на подготовку и выполнение монтажа), необходимость получения специальных разрешений, срок эксплуатации, невосприимчивость электромагнитного шума, максимальная пропускная способность, максимальная дальность связи без повторителей, коэффициент ошибок BER (Bit Error Ratio), наличие резервного канала. При выборе системы связи следует также учитывать влияние физико-географических особенностей местности: погодные условия, прямая видимость, удалённость объектов, наличие препятствий (водоёмы, болотистость, железнодорожные переезды), наличие линий электропередач, сейсмичность. Анализ показал, что ни одна технология связи не может быть применима одинаково во всех ситуациях. Было предложено разработать «Матрицу применимости» для аналитической оценки технико-экономических и физико-географических характеристик технологий связи, которая позволит подобрать оптимальное решение по организации системы передачи данных (рис. 1). Для оценки перспектив повышения уровня безопасной передачи данных по АОЛС был проведён анализ исследовательских работ по реализации технологии КРК в свободной атмосфере [2].

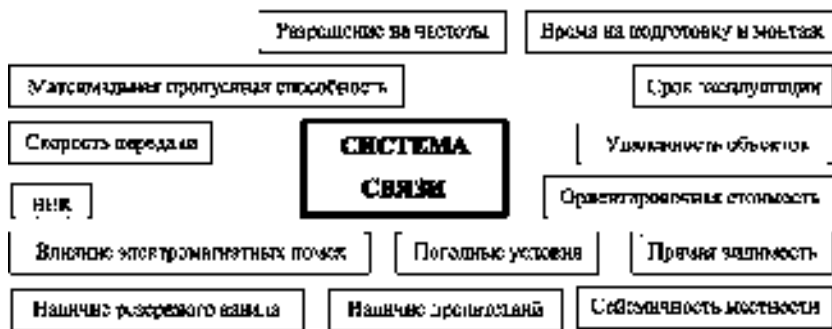


Рис. 1. Критерии «Матрицы применимости»

Список литературы

1. Боев А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. Вып. 15. С. 15-18.
2. Bolotov D.V., et al. //2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. P. 1-5.

М.С. КУЗЬМИН, Н.В. ПЧЕЛКИНА, А.П. НАСАРАИА,
Д.С. КУЗЬМИН, С.Н. КУЗНЕЦОВ¹

*Московский технический университет связи и информатики
¹АО «МОСТКОМ», Рязань*

КОРРЕЛЯЦИЯ ПОТЕРЬ В КВАНТОВОМ И ИНФОРМАЦИОННОМ КАНАЛАХ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ С КВАНТОВЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КЛЮЧЕЙ

Проведён анализ корреляций потерь мощности в квантовом и информационном каналах для двух модификаций терминалов атмосферной лазерной связи, применявшихся в уникальной научной установке, созданной для исследования технологий квантового распределения ключей в свободной атмосфере. Установлено, что после модернизации терминалов атмосферной оптической связи, выполненной в АО «МОСТКОМ», потери мощности сигналов в квантовом и информационных каналах, коррелируют с друг с другом.

M.S. KUZMIN, N.V. PCHELKINA, A.P. NASARAIA,
D.S. KUZMIN, S.N. KUZNETSOV¹

*Moscow Technical University of Communications and Informatics
¹JSC «MOSTCOM», Ryazan*

CORRELATION OF LOSSES IN QUANTUM AND INFORMATION CHANNELS IN ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION LINES WITH QUANTUM KEY DISTRIBUTION

An analysis of power correlations in the quantum and information channels for two modifications of atmospheric laser communication terminals used in a unique scientific facility designed to study quantum key distribution technologies in a free atmosphere is carried out. It has been established that after reaching the terminals of atmospheric optical communication, performed by the restrictions of JSC "MOSTCOM", the signal strengths in the quantum and information channels correlate with another device.

В настоящее время значительное внимание уделяется развитию беспроводных высокоскоростных систем связи, защищённых с применением технологии квантового распределения ключей (КРК) [1]. В работе [1] был предложен перспективный метод создания беспроводных атмосферных каналов связи, защищённых по технологии КРК, в котором

используется модульный принцип построения. Однако исследования [2] выявили определённые сложности, возникающие при попытке минимизировать потери в квантовом канале в атмосферных оптических линиях связи (АОЛС), реализованных штатными алгоритмами, предусмотренными в оптических блоках АОЛС. В [3] была высказана гипотеза, что это может быть связано с конструкцией переходного устройства, через которое подключались блоки КРК к терминалам АОЛС. В АО МОСТКОМ были проведены работы по модернизации этого узла [3]. Целью настоящих исследований являлось систематическое (при разных погодных условиях) изучение потерь в квантовом канале (КК) после его модернизации, а также определение уровня корреляции приёмного сигнала в информационном канале (ИНК) и КК. В экспериментах использовалась установка и методика [2].

На рис. 1 приведены типичные зависимости мощности лазерного излучения, зарегистрированного фотоприёмником в КК и ИНК после прохождения атмосферной трассы протяжённостью 200 м. Мощность излучения, подаваемая на оптический модуль АОЛС была одинаковой и изменения мощности, регистрируемой в прошедшем атмосферную трассу лазерном пучке, обусловлены случайными атмосферными флуктуациями. С использованием программы, написанной на языке программирования Python, проводился анализ корреляций потерь в КК и ИНК. Коэффициент корреляции составил по результатам измерений 0.65. Это говорит о принципиальной возможности использования ИНК для периодической подстройки направления для максимизации уровня сигнала в КК.

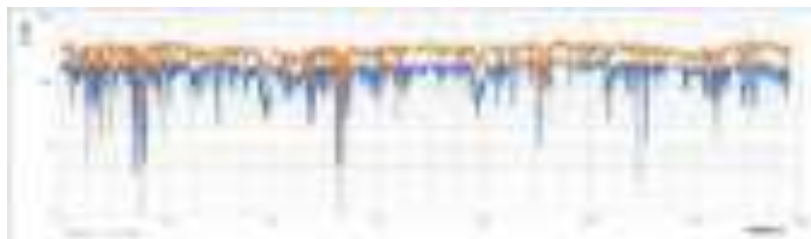


Рис. 1. Зависимости мощности лазерного излучения прошедшего атмосферную трассу: вверху информационный канал, нижняя кривая – квантовый канал

Список литературы

1. Боев А.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48. Вып. 15. С. 15-18.
2. Bolotov D.V., et al. //2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2022. P. 1-5.
3. Кернос И.Ю., Кузнецов С.Н. //Лазерно-информационные технологии: Труды XXX Международной научной конференции. 2022. С. 68-69.

П.О. ЯКУШЕНКОВ

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

МЕТОД РАСЧЁТА СЛОИСТЫХ СТРУКТУР ТИПА SESAM ДЛЯ СКРИПТА ПРОГРАММЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе предлагается вариант расчёта коэффициента отражения слоистых структур типа SESAM для написания скрипта программы, который упростит и ускорит моделирование.

P.O. YAKUSHENKOV

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

THE METHOD OF CALCULATING SESAM LAYERED STRUCTURES FOR THE SIMULATION PROGRAM SCRIPT

In this paper, we propose a method of calculating the reflection coefficient of the SESAM layered structures for writing a program script that will simplify and speed up modeling.

В последнее время многие компании стали выпускать САПРы для ФИС, например Lumerical, COMSOL, PhoeniX. Тем не менее для того, чтобы моделировать различные слоистые структуры типа SESAM необходимо рисовать их вручную. Программа решает уравнения Максвелла и ищет поля в каждой точке, что занимает много времени и вычислительной мощности. Однако если написать скрипт к программе, чтобы можно было задать характеристики такому библиотечному элементу, то моделирование будет осуществляться гораздо быстрее.

Был предложен метод расчёта слоистых структур типа SESAM, чтобы написать скрипт к программе и создать библиотечный элемент с задаваемыми параметрами, которые будут подставляться в матрицу коэффициентов системы линейных уравнений, что упростит вычисления. В частности, это упростит моделирование таких элементов как MIXEL. Разобьём всю структуру на N областей и будем решать волновое уравнение $\Delta\psi + k^2\psi = 0$ для областей, а затем сшивать волновые функции и производные на их границах. Пусть $x_1 = d1$, $x_2 - x_1 = d2$, $x_3 - x_2 = d3...$ Тогда волновая функция в каждой области будет иметь следующий вид:

$$\Psi_i = a_i e^{ik_i(x-x_{i-2})} + b_i e^{-ik_i(x-x_{i-2})}, \quad k_i = 2\pi n_{i-1}/\lambda \quad \text{и} \quad x_{i-2} \leq x \leq x_{i-1};$$

a_i – это амплитуды поля в областях, а коэффициент отражения $R = 1 - |a_N|^2$.

Рассчитаем коэффициент отражения слоистой структуры из 12 слоёв [1]. При падении излучения под углом, волновой вектор должен быть умножен на косинус угла преломления, то есть

$$k_{2m} = k_{2m} * \cos(\arcsin(\sin(\theta)/n_1))$$

и

$$k_{2m+1} = k_{2m+1} * \cos(\arcsin(n_1/n_2 * \sin(\arcsin(\sin(\theta)/n_1))))).$$

При сравнении рассчитанного коэффициента отражения с экспериментальными данными (рис. 1) можно видеть совпадение первого окна прозрачности в пределах погрешности; а также, рассчитав коэффициент для более широкого диапазона длин волн, второе окно прозрачности находится в районе длин волн 500 - 600 нм, что подтверждается этими данными.

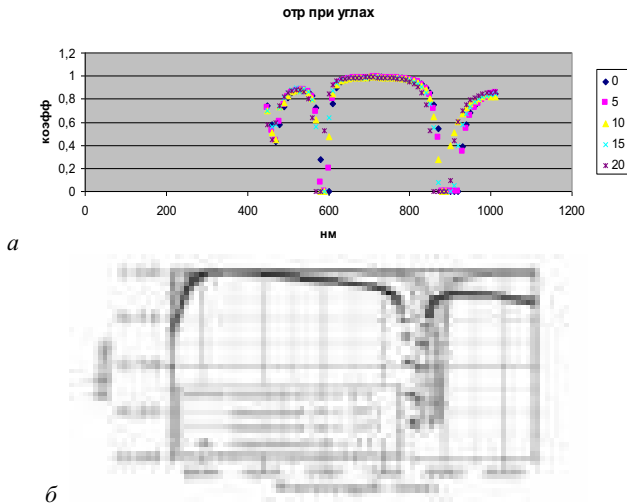


Рис. 1. Расчёт коэффициента отражения слоистой структуры из 12 слоёв (а) и сравнение с экспериментальными данными (б)

Таким образом расчёты данной структуры подтверждают правдоподобность данного метода расчёта для его реализации в качестве скрипта для программы моделирования на ЭВМ.

Список литературы

1. Treshin I.V., Klimov V.V., Melentiev P.N., Balykin V.I. Optical Tamm state and extraordinary light transmission through a nanoaperture // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. P. 023832.

А.В. БАХУС¹, Т.В. КАЗИЕВА^{1,2}, Ж. РАБЕНАНДРАСАНА¹,
Н.С. ТРОФИМОВ^{1,3}

¹*Московский технический университет связи и информатики*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

³*Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Москва*

ИЗМЕРЕНИЕ КВАНТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕТЕКТОРОВ ОДИНОЧНЫХ ФОТОНОВ НА EMQOS 1.0

На основе научно-образовательного комплекса EMQOS 1.0, создан стенд для исследований характеристик детекторов одиночных фотонов и разработанных для них плат управления. Представлены описание экспериментальной установки и её основных параметров, показана возможность применения собранного стенда для метрологии фотоприёмников в области телекоммуникационных длин волн. Представлены результаты тестирования детектора одиночных фотонов, предназначенного для работы в системах квантовой связи.

A.V. BACHUS¹, T.V. KAZIEVA^{1,2}, J. RABENANDRASAN¹,
N.S. TROFIMOV^{1,3}

¹*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

³*National University of Science and Technology MISiS, Moscow*

MEASURING THE QUANTUM EFFICIENCY OF SINGLE PHOTON DETECTORS ON EMQOS 1.0

On the basis of the scientific and educational complex EMQOS 1.0, a stand was created to study the characteristics of single photon detectors and control boards developed for them. A description of the experimental setup and its main parameters is presented. The possibility of using the assembled experimental stand for the metrology of photodetectors in the field of telecommunication wavelengths is shown. The results of testing a single photon detector designed for operation in quantum communication systems are presented.

Известно, что одним из основных ключевых элементов систем связи что связи, защищённых по технологии квантового распределения ключей (КРК), является детектор одиночных фотонов (ДОФ) [1]. Поэтому одной из важнейших задач при создании коммерческих систем квантовой связи является разработка метрологического комплекса, включающего в себя установку и набор методик для тестирования характеристик ДОФ.

Поскольку разработка идеального источника одиночных фотонов представляет известные проблемы, многие исследователи предлагают использовать ослабленные лазерные импульсы [2]. В настоящее время многие университеты имеют в своём распоряжении научные образовательные комплексы EMQOS 1.0, разработанные для исследований в области квантовой оптики и технологии КРК [3]. В связи с этим представляется интересным использовать возможности модульной платформы, созданной российской фирмой QRate для создания метрологического стенда, позволяющего изучать характеристики ДОФ.

Основной целью настоящей работы являлось разработка экспериментального стенда для метрологических измерений характеристик ДОФ. Кроме этого, одной из задач исследований являлось дальнейшее развитие модульной платформы НОК EMQOS 1.0 [3], в частности возможности использование программно-аппаратного комплекса этой установки для тестирования внешних устройств. Максимально используя модульный принцип платформы НОК EMQOS 1.0 нами был собран стенд, принципиальная схема которого показана на рис. 1а и проведены систематические исследования его характеристик. На рис. 1б показаны осциллограммы лазерных импульсов, до их ослабления до уровня соответствующему среднему уровню энергии – один фотон на импульс, кроме этого показаны синхроимпульсы, которые подаются на схему питания и управления ДОФ. В результате исследований было показано, что на основе НОК EMQOS 1.0, может быть создан стенд для тестирования ДОФ, на котором были отработаны методики для получения данных о его квантовой эффективности.

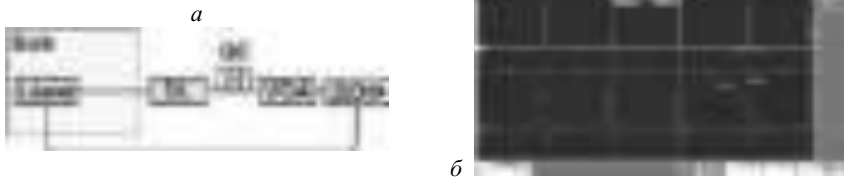


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а), осциллограммы лазерных и синхроимпульсов с платы НОК (б)

Список литературы

1. Калачев А.А. //Фотоника. 2017. № 1. С. 88-101.
2. Миронов Ю.Б. и др. //Научное применение технологий в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 6. С. 22-33.
3. Rodimin V., et al. // 2019 International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON Proceedings. Tomsk, 2019. P. 8729637.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ФОКУСИРОВКА ЧАСТИЧНО-КОГЕРЕНТНЫХ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ СВЕТА В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Исследовано непараксиальное распространение частично когерентных вихревых пучков света в свободном пространстве с помощью метода разложения падающего поля на когерентные бездифракционные моды. Проанализировано влияние эффектов непараксиальности на фокусировку когерентных вихревых пучков.

N.I. PETROV

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

FOCUSING OF PARTIALLY COHERENT VORTEX LIGHT BEAMS IN FREE SPACE

The nonparaxial propagation of partially coherent light beams carrying vortices in free space is investigated using the method of decomposition of the incident field into coherent diffraction-free modes. The influence of nonparaxiality effects on the focusing of coherent vortex beams is analyzed.

Когерентные свойства полей необходимо учитывать во многих задачах распространения волн в свободном пространстве и в неоднородных средах [1]. Это связано с тем, что реальные источники (лазеры, светодиоды и другие) генерируют частично когерентное излучение, а чисто когерентные источники, как правило, не реализуются на практике.

В настоящей работе непараксиальное распространение частично когерентных вихревых световых пучков с корреляцией Бесселя в свободном пространстве исследуется с использованием метода разложения падающего поля по когерентным модам [2 - 6]. Получены аналитические выражения для коэффициентов разложения по модам. Представлены аналитические выражения для распределения интенсивности и степени когерентности. Проанализировано влияние эффектов непараксиальности на распределение интенсивности поля в осевом и радиальном направлениях в плоскости фокусировки.

На рис. 1 представлены осевое и поперечное распределения интенсивностей сфокусированного гауссова пучка.

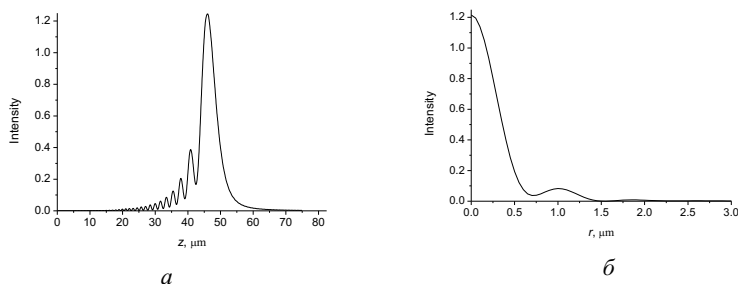


Рис. 1. Распределения интенсивностей в осевом (а) и радиальном (б) направлениях, радиус падающего пучка $w = 30$ мкм, длина волны $\lambda = 0.63$ мкм и радиус кривизны волнового фронта $R_f = 50$ мкм. $z_f = 46.0$ мкм – плоскость фокуса

Как следует из расчётов, фокальные плоскости параксиального и непараксиального пучков не совпадают. Плоскость фокусировки смещается в противоположном осевом направлении по сравнению с геометрической плоскостью фокусировки, если учитывается влияние непараксиальности. Для падающего гауссова пучка шириной $w = 30$ мкм и радиусом кривизны волнового фронта $R_f = 50$ мкм мы получаем смещение фокальной плоскости на 4.0 мкм (рис. 1а). Отметим, что аналогичные эффекты были продемонстрированы при фокусировке гауссова пучка в градиентной среде [2].

Таким образом, продемонстрирована возможность анализа непараксиального распространения и фокусировки вихревых пучков Бесселя–Гаусса в свободном пространстве с использованием метода разложения поля по модам. Показана заметная асимметрия в осевом распределении интенсивности перед фокусом и позади него, вызванная непараксиальностью.

Результаты могут быть полезны для улавливания микрочастиц, а также могут представлять интерес для передачи информации, оптической визуализации и оптической связи в свободном пространстве.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Mandel L., Wolf E. Optical coherence and quantum optics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
2. Petrov N.I. // Opt. Exp. 2001. V. 9. P. 658-673.
3. Petrov N.I. // Fibers. 2021. V. 9(6). P. 34.
4. Petrov N.I., Petrova G.N. // Opt. Exp. 2017. V. 25(19). P. 22545-22564.
5. Petrov N.I. // Phys. Rev. A. 2013. V. 88. P. 023815.
6. Petrov N.I. // Photonics. 2022. V. 9. P. 162.

М.В. БРЕЦЬКО, Я.Е. АКИМОВА, А.В. ВОЛЯР,
С.И. ХАЛИЛОВ, Ю.А. ЕГОРОВ, А.О. ИВАХНЕНКО

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

ВИХРЕВЫЕ ПУЧКИ ЛАГЕРРА–ГАУССА, УСТОЙЧИВЫЕ К ПРОСТОМУ АСТИГМАТИЗМУ

В работе исследуются структурированные пучки Лагерра–Гаусса с двумя управляющими параметрами при астигматическом преобразовании. Представленные пучки являются структурно устойчивой суперпозицией стандартной моды Лагерра–Гаусса и гибридной моды Эрмита–Лагерра–Гаусса. Изменяя фазовый параметр такого пучка, можно получить волновые решения, которые будут устойчивыми при простом астигматизме.

M.V. BRETSKO, Ya.E. AKIMOVA, A.V. VOLYAR,
S.I. HALILOV, Yu.A. EGOROV, A.O. IVAKHNENKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

LAGUERRE-GAUSSIAN VORTEX BEAMS WITH RESISTANCE TO SIMPLE ASTIGMATISM

The paper studies structured Laguerre–Gaussian beams with two control parameters under an astigmatic transformation. The presented beams are a structurally stable superposition of the standard Lager–Gauss mode and the hybrid Hermite–Laguerre–Gauss mode. By changing the phase parameter of such a beam, one can obtain wave solutions that are stable under simple astigmatism.

Последние пять лет уделяется большое внимание управлению массивами данных в структурированных пучках света за счёт таких управляющих параметров как орбитальный, спиновый угловые моменты, а также топологический заряд (ТЗ) пучка [1]. Особое внимание в данной области уделяется работам таких ученых как Э. Форбса [2], Ё. Чена [3]. Как показал ряд работ, структурированные пучки обладают весьма высокой сопротивляемостью к различного рода возмущениям и способны к самовосстановлению при распространении [4].

Целью работы является исследование устойчивости структурированных пучков Лагерра–Гаусса (ЛГ) к простому астигматизму при определённых значениях управляющих параметров.

Стандартный пучок ЛГ можно представить в виде конечной суммы мод Эрмита–Гаусса (ЭГ):

$$sLG_{n,\ell}(\mathbf{r}, \varepsilon, \theta) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3/2} n!} \sum_{k=0}^{2n+1} (2i)^k \times P_k^{(n+1-k, n-k)}(0) HG_{2n+1-k, k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

Для управления амплитудой и фазой пучка внесем под знак суммы (1) множитель: $\varepsilon_k(\varepsilon, \theta) = 1 + \varepsilon e^{ik\theta}$. На рис. 1 представлены распределения интенсивности полученных пучков при различных параметрах ε и θ . Пропуская такой пучок через цилиндрическую линзу, можно подобрать фазовый параметр так, что пучок не изменит своё распределение интенсивности. Сравнение типичных картин интенсивности астигматических сЛГ пучков в разных состояниях (n, ℓ) показано на рис. 2. Подобные свойства пучков могут быть полезны при создании уплотнённых по орбитальному угловому моменту оптических линий связи.

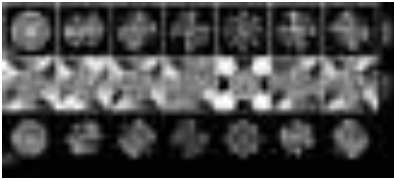


Рис. 1. Теоретические (а) и экспериментальные (б) картины интенсивности и фазы сЛГ-пучка для амплитудного параметра $\varepsilon = 1$

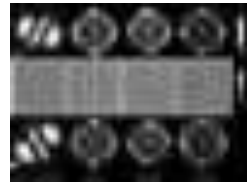


Рис. 2. Экспериментальные картины интенсивности сЛГ (а) и астигматических сЛГ (б) пучков для различных (n, ℓ) с амплитудным $\varepsilon = 1$, фазовым $\theta = \pi/2$, и их интерференционные картины (б)

Список литературы

1. Rubinsztein-Dunlop H., Forbes A., Berry M., Dennis M., et al. Roadmap on structured light // J. Opt. 2017. V. 19. P. 013001.
2. Forbes A., Oliveira M., Dennis M.R. Structured light // Nat. Photon. 2021. V. 15. P. 253-262.
3. Shen Y., Wang X., Xie Z., Min C., Fu X., Liu Q., Gong M., Yuan X. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // Light Sci. Appl. 2019. V. 8. P. 1-29.
4. Soifer V.A., Korotkova O., Khonina S.N., Shchepakina E.A. Vortex beams in turbulent media: Review // Computer Optics. 2016. V. 40 (5). P. 605-624.

А.А. САВЕЛЬЕВА^{1,2}, Е.С. КОЗЛОВА^{1,2}

¹*Институт систем обработки изображений РАН –
филиал ФНИИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара*

²*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ ПЛАЗМОННЫМИ ЛИНЗАМИ СО СПИРАЛЕВИДНЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В данной работе предложен дизайн компактной плазмонной линзы из металлической плёнки со спиралеобразным отверстием. С помощью численного моделирования исследуется формирование оптических вихрей плазмонной линзой. Для проведения численных экспериментов использовался программный пакет FullWAVE, основанный на методе конечных разностей во временной области (FDTD-методе). Для задания входных распределений пучков, обработки и визуализации полученных результатов использовались авторские программы, написанные на языке MATLAB.

А.А. SAVELYEVA^{1,2}, E.S. KOZLOVA^{1,2}

¹*Image Processing Systems Institute – Branch of the Federal Scientific Research Centre
«Crystallography and Photonics» of the RAS, Samara*

²*Samara National Research University*

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF GENERATION OF OPTICAL VORTICES BY PLASMON LENSES WITH SPIRAL HOLES

In this paper, we propose the design of a compact plasmon lens made of a metal film with a spiral hole. Numerical simulation is used to study the formation of optical vortices by a plasmonic lens. Numerical experiments were performed using the FullWAVE software package based on the finite difference method in the time domain (FDTD method). To set the input distributions of beams, processing and visualization of the obtained results, author's programs in the MATLAB language were used.

Плазмонные линзы стали широко использоваться в передовых научных исследованиях благодаря уникальным оптическим свойствам [1, 2]. Одно из таких свойств – способность возбуждать и фокусировать поверхностные плазмон-поляритоны, которые представляют собой сильно локализованные поверхностные волны оптического диапазона, распространяющиеся вдоль границы раздела двух сред [2]. Отметим, что с

помощью плазмонных линз можно так же формировать оптические вихри [4], которые представляют собой волновую структуру с нулевой амплитудой в центре и с сингулярностью в поперечном распределении фазы.

В данной работе предложен дизайн компактной плазмонной линзы из серебряной плёнки со спиралеобразным отверстием. Толщина серебряной плёнки равна $h_1 = 100$ нм. Плёнка предполагается быть нанесённой на подложку из кварцевого стекла, толщина которого также равна $h_2 = 100$ нм. Для проведения численного моделирования распространения света через рассматриваемую плазмонную линзу (рис. 1) применялся FDTD-метод, реализованный в программном пакете FullWAVE. В качестве падающего излучения рассматривалась плоско-поляризованная ТЕ-волна ($\lambda = 0,532$ мкм, что соответствует зелёному лазеру). Результаты моделирования показали, что на расстоянии 9 мкм формируется оптический вихрь, распределение интенсивности которого имеет кольцевую структуру с пиком в центре (FWHM = 1,1 мкм). Полученные результаты могут найти своё применение в различных областях, таких как оптические телекоммуникации и оптическое микроманипулирование.

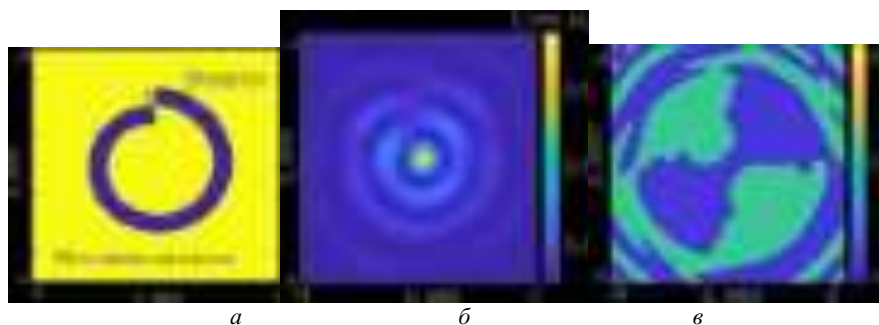


Рис. 1. Схема плазмонной линзы (а), интенсивность (б) и фаза (в) на расстоянии 9 мкм от рельефа плазмонной линзы

Список литературы

1. Fu Y., Zhou X. // Plasmonics. 2010. V. 5. P. 287-3102.
2. Li P., Zhang Q., Li H., Wang Y., Liu L., Teng S. // Plasmonics. 2018. V. 13. P. 1929-1933.
3. Prinz E., Spektor G., Hartelt M., Mahro A.-K., Aeschlimann M., Orenstein M. // Nano Lett. 2021. V. 21. P. 3941-3946.

Н.И. ПЕТРОВ, Ю.М. СОКОЛОВ, В.В. СТОЯКИН,
В.А. ДАНИЛОВ, В.В. ПОПОВ¹, Б.А. УСИЕВИЧ²

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

²*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва*

НАБЛЮДЕНИЕ УГЛОВОГО СДВИГА ГУСА–ХЕНХЕН ПРИ ПЛАЗМОННОМ РЕЗОНАНСЕ В СУБВОЛНОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТКАХ

Высокая чувствительность формы отражённого пучка и сдвига Гуса–Хенхен к изменению угла падения вблизи поверхностного плазмонного резонанса (ППР) показана с помощью строгих электромагнитных расчётов и продемонстрирована экспериментально.

N.I. PETROV, Yu.M. SOKOLOV, V.V. STOIAKIN,
V.A. DANILOV, V.V. POPOV¹, B.A. USIEVICH²

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

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow*

OBSERVATION OF THE ANGULAR GOOS–HÄNCHEN SHIFT NEAR THE SURFACE PLASMON RESONANCE IN SUBWAVELENGTH GRATINGS

The high sensitivity of the beam shape transformation and the Goos–Hänchen shift to a change in the angle of incidence near the SPR is shown by rigorous electromagnetic simulation and demonstrated experimentally.

Пространственные смещения отражённого пучка на границе раздела двух сред относительно падающего представляют собой хорошо известный сдвиг Гуса–Хенхен (ГХ) в плоскости падения [1, 2]. Заметное увеличение углового смещения можно наблюдать для сильно сфокусированного пучка, отражённого диэлектрической границей раздела вблизи угла Брюстера [3]. В [4] исследовано смещение центра тяжести сагиттальных лучей, распространяющихся в градиентном световоде. В [5] показано усиление продольного сдвига ГХ вблизи плазмонного резонанса в субволновой дифракционной решётке.

В настоящей работе мы исследуем угловой сдвиг ГХ при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса (ППР) в субволновой никелевой

решётке с периодом $\Lambda = 400$ нм и глубиной $h = 80$ нм. На рис. 1 представлены измеренные профили интенсивности для различных углов падения на расстоянии $z = 11$ см от поверхности решётки. Из измерений следует, что разделение на два пучка происходит для сфокусированного пучка, падающего под углом ППР. На рис. 2 показаны рассчитанные пространственные профили интенсивности в зависимости от поперечной координаты x для различных углов падения.

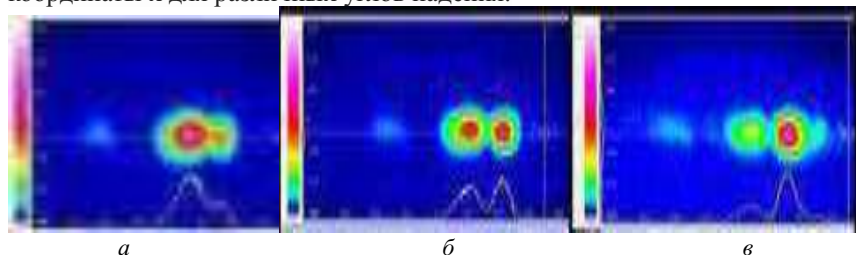


Рис. 1. Профили интенсивностей отражённого пучка от поверхности решётки, углы падения пучка: $\theta_i = 33.43^\circ$ (а), $\theta_i = 33.53^\circ$ (б), $\theta_i = 33.59^\circ$ (в)

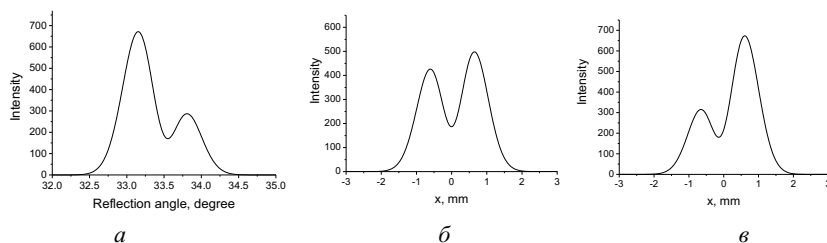


Рис. 2. Зависимости интенсивности отражённого пучка от координаты в поперечном направлении: $\theta_i = 33.43^\circ$ (а), $\theta_i = 33.53^\circ$ (б), $\theta_i = 33.59^\circ$ (в)

Видно, что численные расчёты профилей пучков для различных углов падения демонстрируют очень хорошее согласие с экспериментом.

Результаты могут быть полезны при разработке различных датчиков, оптических переключателей, а также в угловой метрологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания FFNS-2022-0009 и гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Goos F., Hänchen H. // Annalen der Physik. 1947. V. 436. P. 333-346.
2. Tamir T., Bertoni H.L. // J. Opt. Soc. Am. 1971. V. 61. P. 1397-1413.
3. Petrov N.I. // J. Mod. Opt. 2005. V. 52. P. 1545-1556.
4. Petrov N.I. // J. Opt. 2013. V. 15. P. 014011.
5. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Opt. Exp. 2020. V. 28. P. 7552-7564.

В.А. ХАЛЯПИН, А.Н. БУГАЙ¹*Калининградский государственный технический университет
¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна***ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ ДИНАМИКИ
СВЕТОВЫХ ПУЛЬ, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ
В РЕЖИМЕ ТУННЕЛЬНОЙ ИОНИЗАЦИИ**

Проведено аналитическое исследование динамики пространственно-временных импульсов, распространяющихся в среде с фотоионизацией и найдено стационарное решение. Исследована область квазустойчивого распространения таких сигналов.

V.A. KHALYAPIN, A.N. BUGAY¹*Kaliningrad State Technical University
¹Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna***ON THE ANALYTICAL DESCRIPTION OF THE DYNAMICS
OF LIGHT BULLETS PROPAGATING IN THE TUNNEL
IONIZATION REGIME**

An analytical study of the dynamics of space-time pulses propagating in a photoionized medium was carried out and a stationary solution was found. The region of quasi-stable propagation of such signals is investigated.

В настоящей работе предложен подход описания динамики оптических пуль, распространяющихся в диэлектрике при учёте туннельной ионизации. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} + \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \tau^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 \psi}{\partial \tau^3} + \frac{\gamma}{\omega} \frac{\partial}{\partial \tau} (\psi |\psi|^2) - i\gamma \psi |\psi|^2 + \\ + i \frac{s}{2} (\omega \tau_c - i) \psi N_0 \int_{-\infty}^{\tau} W d\tau' - \frac{i\mu}{2} \Delta_{\perp} \psi = 0, \quad (1)$$

здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал, τ – время в сопутствующей системе координат, ω – центральная частота сигнала, N_0 – плотность молекул вещества, $s = k_0 \omega \tau_c / n_0 N_c (1 + \omega^2 \tau_c^2)$, $N_c = \epsilon_0 m \omega^2 / e^2$, e и m – заряд и масса электрона, $\mu = c / n_0 \omega$, n_0 – показатель преломления среды,

γ – коэффициент кубической нелинейности, степень туннельной ионизации
 $W = W_0 (|\psi| / B_T)^{5/2} \exp(-B_T / |\psi|), \quad W_0 = \sqrt{\pi} U_i^{5/2} m^{3/2} / 9 \sqrt{8} i^4 N_0,$
 $B_T = \pi m^{1/2} U_i^{3/2} / 2e i [1], \quad i$ – постоянная Планка, U_i – потенциал ионизации молекулы вещества.

Анализ динамики параметров сигнала проводился на основе метода моментов [1] с пробной функцией

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau}{\tau_p} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + i \left(\phi + \Omega \tau - C \frac{\tau^2}{2\tau_p^2} - \frac{\varepsilon r^2}{2R^2} \right) \right], \quad (2)$$

где B – амплитуда сигнала, R – параметр, пропорциональный радиусу сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей, $2\tau_p$ – величина, пропорциональная длительности сигнала, C – модуляция частоты, ϕ – фазовая добавка, Ω – смещение частоты. Все параметры зависят от координаты z . Определим моменты импульса [2]. Дифференцируя выражения для моментов по координате z и используя (1), можно получить систему уравнений на параметры импульса. Для учёта ионизационного слагаемого мы использовали приближение

$$\exp(B_T / |\psi|) \approx \exp(-B_T / B_0 - (B_T / 2B_0)(r^2 / R^2 + \tau^2 / \tau_p^2)). \quad (3)$$

Линеаризуя полученную систему, можно получить корни характеристического уравнения. Анализ действительной части корней позволит сделать вывод об области квазиустойчивости световых пучь.

Список литературы

1. Keldysh L.V. // Sov Phys JETP. 1965. V. 20. P. 1307-1314.
2. Santhanam J. // Opt. Commun. A. 2003. V. 222. P. 413-420.

А.А. БОГДАНОВ, С.В. ПАНИН, А.В. ЕРЕМИН,
П.С. ЛЮБУТИН, А.В. БЯКОВ, К.С. ПАНИН¹

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕГРАДАЦИИ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

На базе сервогидравлической испытательной машины, управление которой синхронизировано с работой оптической системы измерения деформации по принципу DIC, разработан лабораторный комплекс для изучения процессов усталости полимеров и полимерных композитов. Показано, что важной количественной мерой, отражающей развитие усталости в них, является величина потерь энергии на гистерезис, а также остаточная деформация. Оценки петель механического гистерезиса по параметрам секущего и динамического модуля, а также площади и остаточной деформации, получаемые методом DIC, были эффективно использованы для интерпретации отличия усталостных характеристик на стадии накопления рассеянных повреждений.

A.A. BOGDANOV, S.V. PANIN, A.V. EREMIN,
P.S. LYUBUTIN, A.V. BYAKOV, K.S. PANIN¹

*Institute of Strength Physics and Materials Science of the SB RAS, Tomsk
¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

OPTICAL STRAIN MEASUREMENT SYSTEM FOR ESTIMATING DEGRADATION OF ENFORCED POLYMER COMPOSITES UNDER CYCLIC LOADING

On the basis of a servo-hydraulic testing machine, the control of which is synchronized with the operation of an optical strain measuring system by the DIC principle, a laboratory system has been developed for studying the fatigue processes of polymers and polymer composites. It has been shown that the energy loss and residual strain is an important quantitative measure reflecting the development of fatigue. The estimates of mechanical hysteresis loops in terms of the secant and dynamic modulus, as well as the area and residual strain obtained by the DIC method was effectively used to interpret the difference in fatigue characteristics at the stage of scattered damage accumulation.

На базе сервогидравлической испытательной машины, управление которой синхронизировано с работой оптической системы измерения

деформации по принципу DIC, разработан лабораторный комплекс для изучения процессов усталости полимеров и полимерных композитов. Регистрация нагрузочных данных основана на аппаратных показаниях силоизмерителя испытательной машины. Оценка деформации проводится оптическим методом, что позволяет повысить точность за счёт измерения только в пределах рабочей зоны образца (при высокой степени локальности). Оценки деформации проводится путём: а) определения удлинения образца между двумя точками в режиме оптического экстензометра; б) расчёта полного поля деформации в зоне интереса (RoI).

По зарегистрированным данным напряжений и деформаций строятся петли механического гистерезиса, с последующим определением их площади и модулей упругости (динамического и секущего). Модули упругости определяли по углу наклона прямой, соединяющей точки минимальной и максимальной деформации (момент начала нагружения и момент его окончания). Данный параметр является комплексной величиной, отражающей вязкую и упругую компоненты деформации. Показано, что для усталостных испытаний композита на основе полиимида, армированного короткими углеродными волокнами, снижение частоты нагружения до 0,02 Гц и увеличение количества точек на петлю до 250 обуславливают более гладкий характер изменения площади петель, достаточный для корректного измерения.

Показано, что важной количественной мерой, отражающей различие усталостного поведения полимерных композитов, является величина потерь энергии на гистерезис и остаточная деформация. Таким образом, оценка петель механического гистерезиса по параметрам секущего и динамического модуля, а также площади, получаемая методом DIC может быть эффективно использована для интерпретации отличия усталостных характеристик на стадии накопления рассеянных повреждений, однако это не позволяет однозначно прогнозировать остаточную долговечность. Решение данной задачи требует проведения системных исследований с использованием методов математического моделирования.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-19-00741.

Список литературы

1. Panin S.V., Bogdanov A.A., Eremin A.V., Buslovich D.G., Alexenko V.O. // Materials. 2022. No. 15. P. 4656.

И.А. МУРАВЬЕВ, Ю.В. СТРОГАНОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

БАЗА ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИКИ

Предложены общие принципы организации баз данных для совместного использования с расчётными программами задач линейной и нелинейной оптики.

I.A. MURAVIEV, Yu.V. STROGANOV

Bauman Moscow State Technical University

DATABASE FOR LINEAR AND NONLINEAR OPTICS PROBLEMS

The general principles of databases organizing for applications with linear and nonlinear optics computational programs are proposed.

Для решения задач линейной и нелинейной оптики используются экспериментальные данные свойств различных материалов, которые обычно публикуются в открытых источниках. Ранее данные о физических параметрах публиковались в виде печатных изданий. Они имеют свою практическую ценность, но в современных условиях целесообразен переход на организацию данных в виде компьютерных версий баз данных (БД). Это сохраняет возможность использования данных в качестве справочного пособия, и позволяет организовать связь БД с расчётными программами. До настоящего времени подобного типа задачи не ставились и не решались. Целью работы является определение общих принципов организации таких БД для использования в задачах линейной и нелинейной оптики.

Для проектирования БД необходимо определить особенности используемых видов данных. Во-первых, они могут иметь различные формы представления. В общем случае их можно разделить на две группы.

1. Выражения для физических параметров различного вида. Предложен способ представления данных для таких выражений в БД.

2. Значения физических параметров в виде отдельных отсчётов или наборов отсчётов. Особенностью является их формат. Из анализа опубликованных данных были определены основные форматы.

Представлено разделение исходных данных на группы параметров, имеющих общую физическую природу и использующихся совместно в расчётах. Для каждой такой группы создается суб-БД. Все данные имеют библиографические ссылки на публикации, которые объединены в отдельную суб-БД, связанную со всеми суб-БД физических параметров.

Предложенное решение имеет ряд достоинств. Во-первых, в расчёте одновременно будет использоваться лишь одна суб-БД. Во-вторых, суб-БД несвязанных параметров являются независимыми. Это позволяет пополнять и использовать их раздельно. Такой подход даёт возможность уменьшить время обработки запросов к БД в процессе работы, проводить независимую отладку, и, при необходимости, доработку всех суб-БД.

Наиболее подходящей моделью данных для разрабатываемой БД является реляционная, поскольку она предоставляет все необходимые инструменты описания предметной области и допускает необходимые типы связей в терминах отношений между сущностями.

В качестве инструмента реализации хранения данных в работе используется система управления базами данных (СУБД) с открытым исходным кодом PostgreSQL. Кроме поддержки стандартных конструкций языка SQL, имеется возможность определения пользовательских типов данных, что позволит реализовать предложенный способ представления экспериментальных отчётов. Также средства указанной СУБД позволяют создавать несколько схем хранения данных в рамках одной базы, что даёт возможность удобного разделения на отдельные суб-БД.

Выполнена разработка и апробация БД с определённой выше организацией данных на примере физических параметров нелинейных кристаллов. Структура таблиц экспериментальных отчётов суб-БД оптических параметров представлена на рис. 1. Поле `bib_id` определяет связь с БД библиографии, `crystal_id` — с кристаллом.

The image shows a screenshot of a PostgreSQL database interface displaying the structure of a table. The table has several columns, including 'bib_id' and 'crystal_id', which are mentioned in the text as being linked to a bibliography database and a crystal database, respectively. The columns are listed with their data types and constraints.

Рис. 1. Структура таблиц суб-БД оптических параметров

А.Н. МЕЛЬНИКОВ

НПО «Государственный институт прикладной оптики», Казань

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕКЛАССИЧЕСКИХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК

Предложена модификация принципов построения и функционирования делительной машины маятникового типа, открывающая новые возможности формообразования криволинейных штриховых структур светосильных неклассических сферических и тороидальных дифракционных решёток.

A.N. MELNIKOV

Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan

IMPROVEMENT OF THE ENGINE FOR FABRICATION OF NON-CLASSICAL DIFFRACTION GRATINGS

A modification of the principles of construction and operation of the pendulum-type ruling engine is proposed. It opens up the new possibilities of shaping curvilinear groove structures of high-aperture non-classical spherical and toroidal diffraction gratings.

Известно, что эффективная компенсация астигматизма в оптических схемах спектральных приборов достигается не только за счёт применения в них дифракционных решёток (ДР) на вогнутых асферических поверхностях, но и за счёт формирования системы криволинейных штрихов (КШ) сферических и тороидальных ДР (СДР и ТДР) [1, 2]. Показано, что в рамках технических решений [3 - 5] в плоскости, касательной к вершине СДР (или ТДР), образуется система проекций КШ, радиусы кривизны ρ_i ближайших вершинных окружностей которых обратно пропорциональны заданной координате y_i , что ведёт к снижению практических возможностей по компенсации, в первую очередь, астигматизма.

В целях расширения возможностей компенсации аберраций СДР и ТДР за счёт формирования системы проекций КШ с кривизной их ближайших вершинных окружностей одного знака и ρ_0 проекции центрального штриха, отличного от ∞ , предлагается использовать делительную машину маятникового типа [3], модифицируя основные принципы её построения и функционирования: а) обеспечение перекрещивания между собой осей поворота резцовой (РК) и делительной (ДК) кареток; б) конструкция РК должна быть Г-образного типа; в) конструкция ДК должна содержать механизм перемещения и фиксации оси поворота ДК (в горизонтальной

плоскости) для смещения этой оси на заданное расстояние от плоскости, в которой перемещается алмазный резец при нарезке штрихов; г) конструктивные параметры РК по высоте должны быть больше радиуса кривизны СДР (или радиуса кривизны ТДР в меридиональном сечении).

Применяя последовательность получения математических выражений [4, 5], выведены следующие соотношения для описания геометрических параметров проекций КШ на примере СДР (рассматривается плоскость Oyz , касательная к вершине выпуклой СДР): 1) уравнение проекций КШ

$$\frac{(y_i - R_v \cos \alpha_i)^2}{(r^2 - R_v^2) \sin^2 \alpha_i} + \frac{z_i^2}{(r^2 - R_v^2)} = 1, \quad (1)$$

где r – радиус кривизны СДР, R_v и α_i – текущие полярные координаты (в плоскости Oxy), используемые для описания положения рассматриваемой плоскости сечения, в которой сформирован текущий КШ (причём $R_v < r$); 2) радиус кривизны ρ_i ближайшей вершинной окружности для проекции КШ в зависимости от координаты y_i

$$\rho_i(y_i) = \rho_0 - py_i - qy_i^2 - sy_i^3 - ty_i^4, \quad (2)$$

$$\text{где } \rho_0 = r(\sqrt{r^2 - R_v^2})/R_v, \quad p = (r^2 - R_v^2)/R_v^2, \quad q = -(\sqrt{r^2 - R_v^2})(2r^2 - R_v^2)/2rR_v^3,$$

$$s = (r^2 - R_v^2)/R_v^4, \quad t = -(\sqrt{r^2 - R_v^2})(8r^4 - 4r^2R_v^2 - R_v^4)/8r^3R_v^5;$$

3) переменный шаг $e_{\text{пр}i}$ проекций КШ

$$e_{\text{пр}i}(y_i) \cong e_0(1 - 0,5r^{-2}y_i^2 - 0,125r^{-4}y_i^4), \quad (3)$$

где e_0 – значение периода проекций КШ в вершине выпуклой СДР.

Полученные выражения (1)–(3) могут быть использованы для оптимизации коэффициентов аберраций 1 - 3-го порядков светосильных СДР.

Список литературы

1. Пейсахсон И.В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975.
2. Бажанов Ю.В. Фокусирующие дифракционные решётки и их аберрационные свойства. Приборы на их основе. Автореферат дисс. ... доктора технических наук: 01.04.05. Казань: Гос. оптич. ин-т, 2004.
3. Лукин А.В., Мельников А.Н. Делительная машина маятникового типа для изготовления штриховых структур на неплоских рабочих поверхностях. Патент РФ № 2691821. 2019.
4. Бажанов Ю.В., Лукин А.В., Мельников А.Н. Новые возможности получения неклассических нарезных дифракционных решеток большой апертуры // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 9. С. 44-51.
5. Мельников А.Н. Новые принципы формирования штриховых структур светосильных неклассических нарезных тороидальных дифракционных решёток с применением делительных машин маятникового типа // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 10. С. 95-105.

А.М. ЦАРЕВА, Н.И. ШАКИРОВ, А.А. ЧЕМЕКОВА,
Е.В. БЛАГОВА, Р.Х. МАКАЕВА

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)*

ВЫСОКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СКРЫТЫХ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В работе приводятся примеры определения экспериментальным методом голографической интерферометрии подповерхностных дефектов деталей, содержащих неразъёмные соединения, выполняемые пайкой и сваркой.

A.M. TSAREVA, N.I. SHAKIROV, A.A. CHEMEKOVA,
E.V. BLAGOVA, R.Kh. MAKAEVA

The Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

HOLOGRAPHIC METHOD'S HIGH DESCRIPTIVENESS IN DETECTING INHERENT DEFECTS OF MACHINERY COMPONENTS

This paper contains cases of identifying subsurface flaws in components containing permanent joints created by soldering and welding, by the experimental method of holographic interferometry.

Экспериментальный высокочувствительный метод голографической интерферометрии применяется на производстве при доводке и неразрушающем контроле деталей благодаря информативности и возможности обнаружения скрытых дефектов [1]. Успешно этот метод используется при обнаружении подповерхностных повреждений при контроле деталей, содержащих неразъёмные соединения, выполняемые пайкой и сваркой. Такого вида дефекты известными методами контроля выявить затруднительно, так как тестирования выполняются в статике – без приложения каких-либо периодических нагрузок. В этом случае поверхности могут плотно контактировать, но не быть соединёнными. Во время эксплуатации контакт между несоединёнными элементами нарушается, приводя к разрушению изделия.

В работе приводятся примеры экспериментального определения подповерхностных повреждений на двух деталях. Алгоритм выполнения

испытаний был одинаков: детали жестко крепились на голографическом стенде, возбуждение вибраций выполнялись пьезоэлектрическим способом. В момент резонансных колебаний производились съёмки голографических интерферограмм методом усреднения по времени [2]. По полученным фотографиям форм колебаний проводился анализ.

К подобным деталям относятся сотовые вставки, применяемые в авиационных двигателях качестве лабиринтных уплотнений между торцами лопаток и корпусом. Исследовались годные и дефектные детали.

Анализ показал, что дефектные зоны начали проявляться при колебаниях сотовой вставки на резонансной частоте 20505 Гц. Форма колебаний годной вставки имеет вид с центральной белой продольной узловой линией с пучностями по краям (рис. 1а). На фотографии (рис. 1б) интерферограммы формы резонансных ($f=20048$ Гц) колебаний дефектной вставки в местах, где должна проходить узловая линия, чётко выделяются тёмные участки – зоны дефекта. Возникновение этих зон обусловлено отсутствием связи между пластиной и сотовыми уплотнениями. Пример обнаружения дефекта в виде непропая одной лопатки со стороны покрывного диска колеса центробежного компрессора представлен на рис. 1в. Резонансная частота колебаний $f=7410$ Гц. Как видно из этого рисунка, дефект, находившийся в левом секторе колеса, «нарушил» колебания детали по классической форме пяти узловых диаметров (рис. 1г) [3]. В зоне дефекта наблюдается дополнительная пучность.

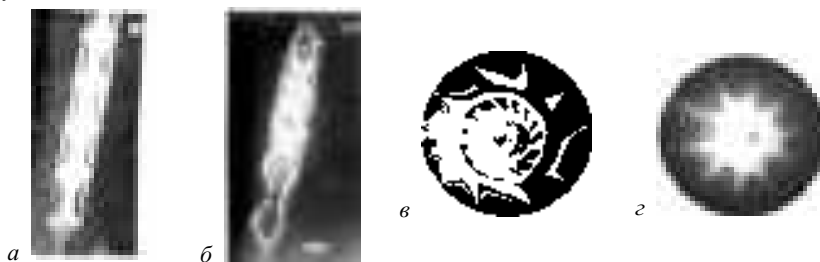


Рис. 1. Вид годной вставки (а) и вставки с выявленными дефектами (б), пример дефекта в виде непропая (в), нарушившего классической вид колебаний детали (г)

Список литературы

1. Голографические неразрушающие исследования. М.: Машиностроение, 1979.
2. Макаева Р.Х., Каримов А.Х., Царева А.М. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011.
3. Макаева Р.Х., Царева А.М., Каримов А.Х. // Известия вузов. Авиационная техника. 2008. № 1. С. 41-45.

Е.Ю. ЛЕТОВА, Т.В. ИВАНОВА, Д.С. ЗАВГОРОДНИЙ¹
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
¹*ОАО ЛОМО, Санкт-Петербург*

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ
ДЛЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ТЕСТ-ОБЪЕКТОВ**

В работе рассмотрена разработка программы для анализа качества оптических систем по зарегистрированным изображениям линейных и точечных тест-объектов с учётом характеристик приборной части программно-аппаратного комплекса. Приведено описание основного функционала программного обеспечения и показаны методы настройки алгоритмов расчёта характеристик качества изображения для используемой установки контроля.

E. Yu. LETOVA, T.V. IVANOVA, D.S. ZAVGORODNIJ¹
ITMO University, Saint-Petersburg
¹*JSC LOMO, Saint-Petersburg*

**PROGRAM DEVELOPMENT
FOR SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX
FOR OPTICAL SYSTEMS QUALITY CONTROL
BASED ON TEST-OBJECTS IMAGES**

The paper represents the program development for optical systems quality analysis based on registered images of line and spot test-objects with the hardware characteristics of the hardware-software complex considered. The main functionality of the program is described, and images quality characteristics calculation algorithms adjustments methods are shown.

Точный контроль качества создаваемых оптических систем является неотъемлемой частью оптического производства. На практике для контроля качества изображения наряду с классическими интерферометрическими методами широко используются методы контроля по зарегистрированным изображениям тест-объектов. Последние позволяют производить оценку качества оптики по рассчитанным на основе полученных данных концентрации энергии и функции передачи модуляции (ФПМ). При этом для правильного расчёта характеристик качества контролируемой системы необходимо учитывать

искажения масштаба и интенсивности изображения тест-объекта, вносимые компонентами схемы контроля [1].

Целью работы является разработка программного обеспечения для программно-аппаратного комплекса аттестации объективов на предприятии ОАО ЛОМО. Задачи работы были сформулированы в соответствии с техническим заданием заказчика и содержат требования к функциям программного обеспечения для работы с тест-объектами типа «точка» и «щель» конечной ширины. Во-первых, для исключения влияния передаточных характеристик приёмного устройства выполняется предварительная обработка зарегистрированного изображения, а именно фильтрация шумов и удаление фоновой засветки. Далее, при обработке изображения светящейся точки определяются координаты центра пятна рассеяния оптимальным методом, что позволяет минимизировать погрешность вычисления ФПМ как преобразование Фурье от функции рассеяния точки (ФРТ) [2]. В свою очередь для формирования функции рассеяния линии (ФРЛ) и вычисления ФПМ осуществляется суммирование всех сечений изображения светящейся линии с учётом положения центра каждого сечения, что также позволяет уменьшить влияние искажающих факторов на результат вычислений. Во-вторых, в программе учитываются масштабные преобразования, вносимые установкой. Осуществляется пересчёт размера пикселя матрицы приёмного устройства и размера тест-объекта в соответствии с увеличением коллиматора и проекционного объектива. Кроме того, реализована возможность вычисления ФПМ с учётом размера тест-объекта. Для этого рассчитывается отношение фурье-образа зарегистрированного изображения к смоделированному фурье-образу предмета заданного размера [3].

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет производить детальный анализ качества контролируемой оптической системы различными методами, основываясь на обработке зарегистрированных изображений функций рассеяния точечных и линейных тест-объектов. При этом приложение способно учитывать различные характеристики аппаратной части установки обеспечивая исключение влияния внешних факторов на результат измерений.

Список литературы

1. Letova E.Yu., Islamova R.R. // Abstracts of reports of Congress of Young Scientists. 2022.
2. Ivanova T.V., Letova E.Yu., et al. // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2021. V. 21. P. 334-341.
3. Letova E.Yu. // XI Congress of Young Scientists. Collection of scientific papers. 2022. V. 1. P. 637-640.

Д.Г. ДЕНИСОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА
КАНАЛА ФОТОРЕГИСТРАЦИИ МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА
ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ
ШЕРОХОВАТОСТИ СУБНАНОМЕТРОВОГО УРОВНЯ
ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

На базе разработанного макетного образца предложены конструктивные и схемотехнические решения, позволившие оценить чувствительность канала фоторегистрации на основе фотоэлектронного умножителя на уровне шумовых характеристик с приемлемым отношением сигнал-шум, что в значительной степени определяет потенциальную погрешность разработанного метода измерения шероховатости.

D.G. DENISOV

Bauman Moscow State Technical University

**INVESTIGATION OF THE DYNAMIC RANGE
OF THE PHOTOREGISTRATION CHANNEL OF A MOCK-UP
SAMPLE OF AN OPTOELECTRONIC DEVICE
FOR HIGH-PRECISION CONTROL OF THE ROUGHNESS
PARAMETERS OF THE SUBNANOMETER LEVEL
OF OPTICAL PARTS**

On the basis of the developed mock-up sample, constructive and circuit solutions were proposed that made it possible to evaluate the sensitivity of the photoregistration channel based on a photoelectronic multiplier at the level of noise characteristics with an acceptable signal-to-noise ratio, which largely determines the potential error of the developed roughness measurement method.

С целью отработки разработанного модифицированного метода дифференциального рассеяния [1, 2] и проведения исследований по измерению параметров шероховатости в работе предложена функционально-оптическая схема (рис. 1) и разработан макетный образец прибора. В качестве источника излучения *1* был взят гелий-неоновый лазер ЛГН-223-1, излучение которого, прошедшее через

модулятор 10, отражаясь от зеркала 2 (предназначенное для излома оптической оси, для уменьшения габаритов макетной установки) попадает на микрообъектив 3, который увеличивает диаметр пучка излучения. С помощью зеркала 4 расходящийся пучок становится параллельным, для того, чтобы при прохождении модулятора поляризации 5 и поляризатора 6 не внести дополнительных искажений. Затем излучения, проходя через диафрагму 7 и афокальную систему 8, фокусируются с помощью линзы 11 на ФПУ с размером фоточувствительного элемента 0,5 мкм, проходя при этом через исследуемый образец 12. Фотоприёмник размещён на сканирующем устройстве, что позволяет измерять интенсивность отражённого и рассеянного излучения в диапазоне углов $0 - 90^\circ$ относительно нормали к облучаемой поверхности и от -90° до $+90^\circ$ относительно плоскости падения лазерного луча. Расстояние d предполагается изменять в ходе экспериментов. Для определения коэффициента ослабления сигнала канала фоторегистрации от его максимального значения до минимального, определяемого отношением сигнала к шуму, не превышающему 3 применяется система нейтральных светофильтров с соответствующими спектральными характеристиками. Значение максимального коэффициента ослабления составило $\mu_{\Sigma} = 3,96 \cdot 10^{-12}$, величина результирующего сигнала при максимальном ослаблении – $S = 4,69 \cdot 10^{-12}$ Вт а отношения сигнал к шуму – 21,6.

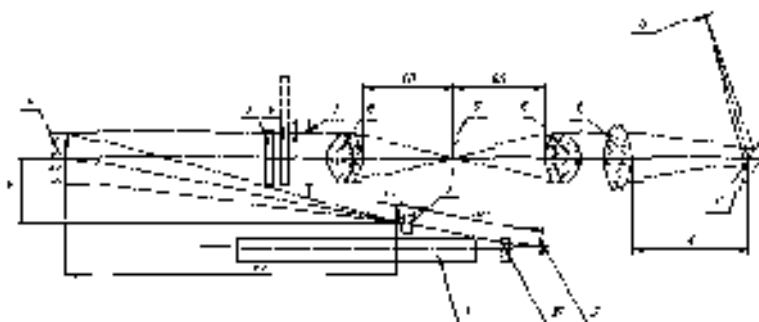


Рис. 1. Схема оптическая функциональная макетного образца оптико-электронного прибора на основе модифицированного метода дифференциального рассеяния

Список литературы

1. Denisov D.G. // Applied Physics. 2022. No. 1. P. 89-96.
2. Azarova V.V., Dmitriev V.G., et al. // Quantum Electronics. 2000. V. 30. No. 4. P. 360-364.

Д.А. САЛАМАТИН

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (филиал), Саров,
Нижегородская обл.*

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ В ЗАДАЧЕ КОРРЕКЦИИ ФАЗОВЫХ АБЕРРАЦИЙ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БИМОРФНЫМ АДАПТИВНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Проведено численное исследование работы 18-ти элементного адаптивного зеркала апертурой $46 \times 56 \text{ мм}^2$ под управлением стохастического параллельного градиентного алгоритма в рамках задачи коррекции волнового фронта лазерного пучка с абберациями. В численной модели в качестве базиса функций отклика актюаторов адаптивного зеркала был взят набор из 18 функций Гаусса. В качестве целевой функций стохастического параллельного градиентного алгоритма рассматривалась мощность пучка в пределах приосевой диафрагмы дифракционного размера. Установлено, что при выборе круглой диафрагмы с размером, равным дифракционному размеру пучка, возможно получить увеличение числа Штреля с $St = 0,05$ до $St = 0,60$ за $N = 2000$ итераций алгоритма, расходимость пучка по уровню 81,5 % энергии снижается с 3,7 до 2,5 дифракционных углов.

D.A. SALAMATIN

Sarov Branch of Lomonosov Moscow State University, Nizhny Novgorod region

STOCHASTIC PARALLEL GRADIENT ALGORITHM IN THE PROBLEM OF LASER BEAM PHASE ABERRATIONS CORRECTION BY AN BIMORPH ADAPTIVE MIRROR

The numerical simulation of operation of an 18 - element adaptive mirror with an aperture of $46 \times 56 \text{ mm}^2$ under the control of a stochastic parallel gradient algorithm has been carried out in a problem of correction of laser beam distorted wave front. In the numerical model a set of 18 Gaussian functions was used as the basis of the adaptive mirror stacked actuators' response functions. The beam's power within the axial diaphragm were considered as the criterion functional (metric) of the stochastic parallel gradient algorithm. It is shown that at choosing a circular diaphragm with a size equal to the diffraction size of the beam it is possible to obtain the Strehl ratio increase from $St = 0.05$ to $St = 0.60$ for $N = 2000$ algorithm iterations, the divergence of the beam at the energy level of 81.5% decreases from 3.7 to 2.5 diffraction angles.

Работу, как непрерывных лазерных комплексов специального назначения, так и мощных импульсных лазерных установок, трудно представить без входящей в их состав адаптивной оптики [1], обеспечивающей на выходе системы лазерное излучение с требуемыми оптическими параметрами. При этом в ряде задач лазерной техники [2], требуется использование пучков с малой угловой расходимостью и однородной пространственной структурой. Поэтому качественная задача компенсаций aberrаций лазерного излучения средствами линейной адаптивной оптики является актуальной.

В данной работе для управления адаптивным зеркалом был выбран стохастический параллельный градиентный (СПГ) алгоритм, особенность которого заключается в одновременной оптимизации целевой функции по всем степеням свободы системы. СПГ алгоритм является модернизированным алгоритмом стохастического параллельного градиентного спуска.

На рис. 1а представлена динамика изменения числа Штреля St и доли мощности в дифракционном угле δP_{difr} пучка в ходе совершения СПГ коррекции с круглой приосевой диафрагмой дифракционного диаметра и малыми напряжениями $\Delta U_0 = 0,01$ В. На рис. 1б изображено распределение интенсивности скорректированного пучка в дальней зоне.

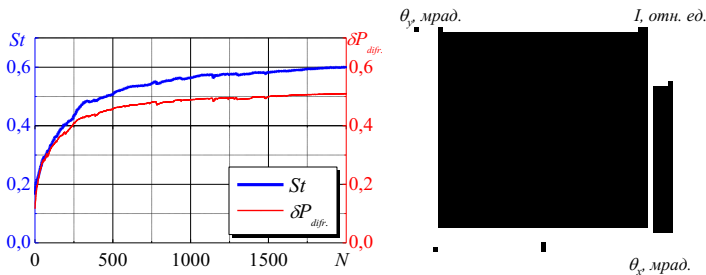


Рис. 1. Динамика изменения параметров St и δP_{difr} в ходе СПГ коррекции при целевой функции в виде доли мощности в угле и $\Delta U_0 = 0,01$ В (а), распределение интенсивности скорректированного пучка в дальней зоне (б)

Расходимость пучка после коррекции по уровню 81,5 % энергии составляет 2,5 дифракционных углов.

Список литературы

1. Лукин В.П. Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // УФН. 2014. Т. 184. № 6. С. 599-640.
2. Лукин В.П. Применения технологий адаптивной оптики для расширения возможностей оптико-электронных систем // Интреэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 8, С. 115-138.

В.А. БУЛГАКОВ^{1,2}, В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ¹, А.П. СЕМЕНОВ²

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

²Лыткаринский завод оптического стекла (АО ЛЗОС)

ЛАЗЕРНЫЙ КОНТРОЛЬ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С ДИФРАКЦИОННОЙ КОРРЕКЦИЕЙ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

В работе рассмотрен интерференционный метод контроля формы поверхности с использованием корректоров волнового фронта – дифракционных оптических элементов. Представлен результат экспериментального контроля оптической детали диаметром 1125 мм. Обсуждаются перспективы применения интерференционного метода контроля с использованием корректоров волнового фронта.

V.A. BULGAKOV^{1,2}, V.I. TELESHEVSKY¹, A.P. SEMENOV²

¹Moscow State University of Technology «STANKIN»

²Lytkarino Optical Glass Factory

LASER CONTROL OF SHAPE DEVIATION OF LARGE DIMENSION SENSITIVE PRODUCTS WITH DIFFRACTIVE AMENDMENT OF THE WAVEFRONT

The paper deals with the interference method of surface shape control using the wavefront correctors - diffractive optical elements. The result of the experimental optical part control with a diameter of 1125 mm has been presented. The application prospects of interference method surface shape control using the wavefront correctors have been discussed.

В настоящее время в АО ЛЗОС для изготовления и контроля крупногабаритных оптических изделий широко применяются дифракционные оптические элементы (ДОЭ). [1]

Дифракционный оптический элемент, рассчитанный и изготовленный с помощью компьютерной техники с записывающим лазерным устройством, позволяет получить на плоской поверхности пластины из стекла дифракционную структуру для преобразования сферического или плоского волнового фронта в асферический.

ДОЭ обычно имеет вид картины искривлённых полос (или зон) нанесённых или вытравленных в материале оптической подложки. Такая картина действует на небольшом участке как дифракционная решётка.

ДОЭ ставится в схему интерферометра (рис. 1), юстируется относительно осветительной ветви и таким образом мы получаем интерферометр для контроля асферической поверхности (рис. 2).

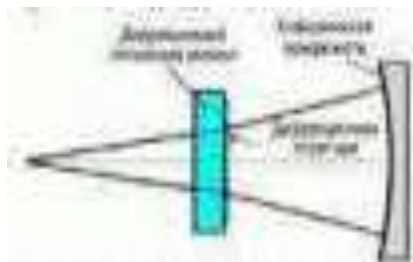


Рис. 1. Принцип работы ДОЭ-корректора в схеме контроля зеркала

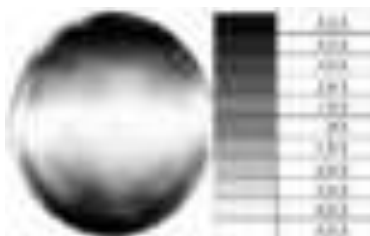


Рис. 2. Результат контроля – карта волнового фронта поверхности

Развитие технологии расчёта и изготовления дифракционных оптических элементов для контроля оптики с асферическими осевыми и внеосевыми поверхностями привело к существенному прогрессу в задачах контроля и формообразования самых сложных оптических элементов, что ранее было недостижимо [2].

Учитывая широкое развитие отечественного машиностроения, появляются новые задачи, с каждым годом возрастает требуемая точность выпускаемых изделий. В связи с этим метод лазерного контроля, с применением дифракционных элементов, может быть предложен для решения проблем измерения формы поверхности прецизионных изделий из различных материалов.

Дальнейшее изучение и разработка методов интерференционного контроля в различных отраслях машиностроения позволит существенно расширить возможности в обработке широкого класса прецизионных изделий, что позволит получать более качественные высокоточные поверхности.

Список литературы

1. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Игнатов А.Н., Никонов А.Б., Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Булгаков В.А., Насыров Р.К. Методы контроля формы поверхности и оптических параметров внеосевых крупногабаритных зеркал на этапе формообразования // Научно-технический журнал «Контенант». 2022. Т. 4, № 1. С. 50-62.
2. Poleshchuk A.G. Computer generated holograms for aspheric optics testing // Proc. SPIE. 2009. V. 7133. P. 713333.

Н.А. ШИПУНОВ, А.А. ОХРИМЕНКО, А.С. АЛЕКСАНДРОВ,
А.В. КРЕТУШЕВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

АНАЛИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВОГО МИКРОСКОПА

В работе рассмотрены вопросы, связанные с использованием оптической фазовой микроскопии в микроэлектронике. Фазовые изображения полупроводниковых поверхностей были получены на разработанном в РТУ МИРЭА когерентном фазовом микроскопе. Показана возможность измерения профиля полупроводниковых поверхностей.

N.A. SHIPUNOV, A.A. OKHRIMENKO, A.S. ALEXANDROV,
A.V. KRETUSHEV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

ANALYSIS OF SEMICONDUCTOR SURFACES USING A PHASE MICROSCOPE

The paper considers issues related to the use of optical phase microscopy in microelectronics. Phase images of semiconductor surfaces were obtained using a coherent phase microscope developed at RTU MIREA. The possibility of measuring the profile of semiconductor surfaces is shown.

Оптическая фазовая микроскопия применяется для решения задач в различных областях науки и техники [1]. В этой работе рассмотрены вопросы, связанные с использованием фазовой микроскопии в микроэлектронике. В этой области совершенствование известных и разработка новых методов контроля и диагностики полупроводниковых микросхем весьма актуально. Особо важное место принадлежит средствам неразрушающего контроля, в частности средствам, основанным на использовании оптической фазовой микроскопии.

Работа выполнена на модифицированном когерентном фазовом микроскопе [1, 2], разработанном на основе микроинтерферометра Линника (МИИ-4, ЛОМО). Фазовые микроизображения были получены методами сдвиговой интерферометрии.

Фазовые изображения нормированы на длину волны источника и позволяют количественно измерять профиль структурных элементов поверхности с точностью до десятых долей нанометра (рис. 1).

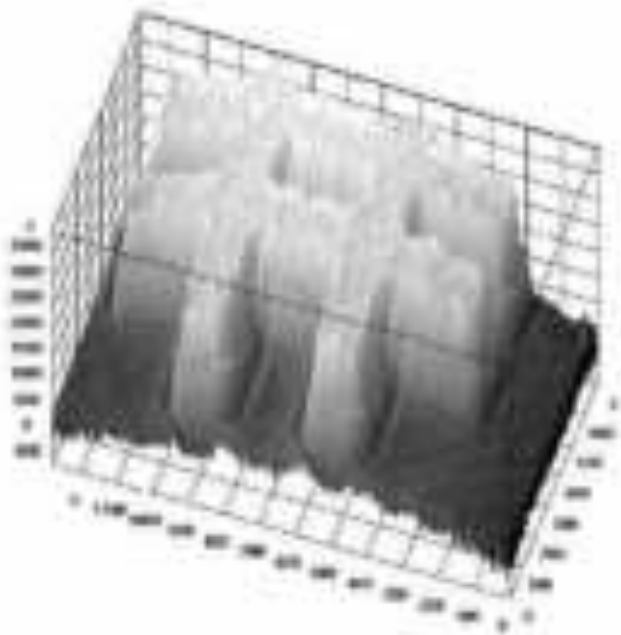


Рис. 1. Топограмма структуры кремниевой пластины (максимальная высота объекта – 300 нм, размер изображения 60 x 80 мкм с объективом 40х)

Список литературы

1. Тычинский В.П. и др. Измерения субмикронных структур на лазерном фазовом микроскопе «Эйрискан» // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 8. С. 754-758.
2. Тычинский В.П., Тавров А.В., Лазерный компьютерный фазовый микроскоп с пространственным разрешением 10 нм // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 3. С. 264-266.

А.В. КУДРЯВЦЕВ^{1,2}, В.И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ¹, А.П. СЕМЕНОВ²

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

²Лыткаринский завод оптического стекла (АО ЛЗОС)

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ В СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ

Приведены результаты контроля шлифованной поверхности с помощью интерференционных методов в среднем ИК-диапазоне для образцов с различной шероховатостью.

A.V. KUDRYAVCEV^{1,2}, V.I. TELESHEVSKIY¹, A.P. SEMENOV²

¹Moscow State University of Technology «STANKIN»

²Lytkarino Optical Glass Factory

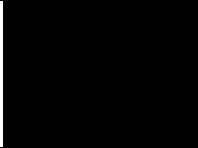
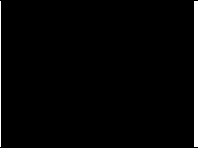
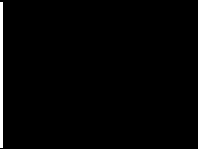

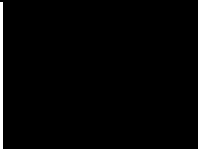
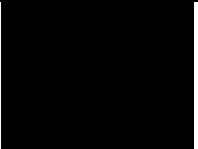

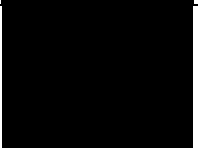
LASER INTERFERENCE CONTROL OF SHAPE DEVIATIONS IN THE MID-IR RANGE

The results of the control of the polished surface using interference methods in the mid-IR range for samples with different roughness are presented.

В оптическом машиностроении широко применяются методы контроля отклонения формы поверхности с помощью интерферометров [1, 2]. Наиболее широко известны интерферометрические схемы контроля в диапазоне длин волн 500 - 700 нм. Для получения интерферограммы с контрастностью достаточной для последующей расшифровки, контролируемая поверхность должна являться зеркально отражающей (высота неровностей микрорельефа меньше или сопоставима с длиной волны). С ростом запроса на оптические элементы с высокой асферичностью (100 и более мкм) появилась необходимость создания средств контроля для деталей с шлифованной поверхностью [3].

Экспериментально подтверждена [3] возможность получения контрастной интерферограммы шлифованной поверхности с помощью ИК-интерферометра. Зависимость контрастности от шероховатости представлена в табл. 1.

Таблица 1. Влияние высот микронеровностей рельефа на контраст интерференционной картины

Ra, мкм	Интерферограмма		Интерферограмма за устранением дефокусировки	
1,6				
1				
0,32				
0,1				

Как видно из табл. 1, ИК-интерферометрия позволяет получить контрастную интерференционную картину на поверхностях с шероховатостью, соответствующей операциям шлифования, а также определённым видам чистового точения и фрезерования. Таким образом, при дальнейшем развитии метод может быть применён для контроля отклонения формы прецизионных изделий не только в оптической промышленности, но и в точном машиностроении.

Список литературы

1. Abdulkadyrov M.A., Druzhinin V.V., Lazareva N.L., Patrikeev V.E., Puryaev D.T., Semenov A.P. Interferometer for multifunctional optical control // Scientific and Technical journal "Content". 2018. V. 17. No. 2. P. 80-85.

2. Teleshevski V.I., Skrynnik A.A. Laser pulse interference system, working in the middle IR range for measuring the geometrical parameters of object // VIII International Conference On Photonics And Information Optics: Collection of Scientific Papers. Moscow, 2019. P. 229-230.

3. Denisov D.G. Development of methods and equipment for laser interference control of the shape and quality of optical surfaces of large-sized mirrors at the grinding stage. Moscow, 2010.

О.Ю. ПИКУЛЬ, К.А. РУДОЙ

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КВАРЦЕВЫХ ЛИНЗАХ

Кристаллическая кварцевая линза рассмотрена в качестве своеобразной фазовой пластинки с плавным криволинейным профилем. Поворот линзы вокруг лабораторной вертикали позволяет получить все формы поляризации излучения на выходе из нее. Методом лазерной коноскопии получена коноскопическая картина кристаллической кварцевой линзы.

O.Yu. PIKOUL, K.A. RUDOY

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk

INTERFERENCE OF OPTICAL WAVES IN CRYSTAL QUARTZ LENSES

A crystalline quartz lens is considered as a kind of phase plate with a smooth curvilinear profile. Turning the lens around the laboratory vertical makes it possible to obtain all forms of radiation polarization at the exit from it. The conoscopic pattern of a crystalline quartz lens was obtained by laser conoscopy.

К настоящему времени многие вопросы, связанные с закономерностями формирования интерференционных картин в сходящемся излучении изучены. Вид коноскопической картины определяется строением, оптическими свойствами и ориентацией кристаллической пластинки, поэтому изучение коноскопических картин играет заметную роль в кристаллофизике. Формирование коноскопических картин возможно не только при прохождении сходящегося излучения через плоскопараллельные кристаллические пластинки, но и в оптических анизотропных системах типа бифокальной призмы, призмы Рошона, ромба Френеля, треугольных призмах [1].

В данной работе приведены результаты по наблюдению коноскопических картин кристаллических кварцевых линз, помещённых между скрещёнными поляризатором и анализатором. Для плосковыпуклой оптической линзы, изготовленной из правовращающего кварца, на экране за анализатором наблюдают коноскопическую картину, подобную коноскопической картине плоскопараллельной оптически

активной пластинки: с кольцами-изохромами с центром на оси пучка; чёрный «мальтийский крест» в центре картины отсутствует.

Экспериментально измеренные зависимости интенсивности прошедшего через поляризатор – плосковыпуклую кварцевую линзу – анализатор излучения от угла θ поворота линзы вокруг вертикальной оси приведены на рис. 1а. При повороте линзы прошедший луч перемещается в области коноскопической картины: 1 – по «мальтийскому кресту»; 2 – под углом 45° к «мальтийскому кресту» (рис 1а). Для сравнения на рис. 1б приведены аналогичные теоретические зависимости для плоскопараллельной кварцевой пластинки толщиной 3,8 мм.

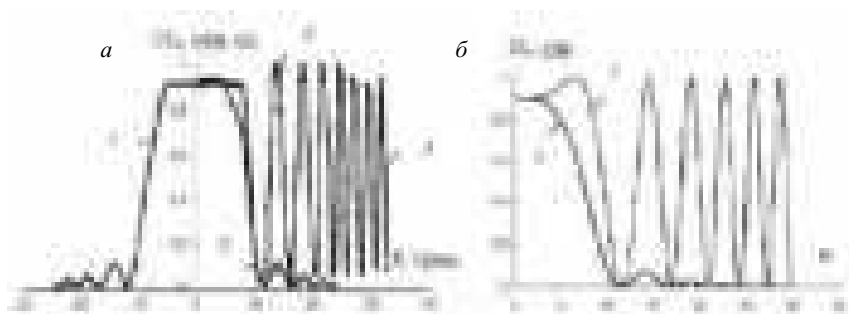


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения, прошедшего поляризатор – анализатор (кристаллическую кварцевую линзу) от угла поворота линзы, толщина вдоль оси 3,8 мм (а); аналогичные теоретические зависимости для кристаллической кварцевой пластинки толщиной 3,8 мм (б)

При постепенном повороте кварцевой линзы вокруг вертикальной оси на выходе из неё поляризация излучения изменяется от линейной до эллиптической, включая циркулярную, что необходимо учитывать при настройке оптических систем.

Кристаллическую кварцевую линзу можно рассматривать как своеобразную фазовую пластинку с плавным криволинейным профилем, обладающей оптической активностью в направлениях, близких к оптической оси.

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Пикуль О.Ю., Теплякова Н.А., Палатников М.Н. Лазерная коноскопия и фотоиндуцированное рассеяние света в исследованиях свойств нелинейно-оптического кристалла ниобата лития. М.: РАН, 2019.

А.В. ГОЛУБЕВ, А.Н. ВДОВЕНКО
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**РАЗРАБОТКА ПЛАСТИКОВЫХ ДЕРЖАТЕЛЕЙ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕМ
ПО X, Y, Z КООРДИНАТАМ И НАКЛОНОМ В ДВУХ
ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ ПЛОСКОСТЯХ**

Разработаны альтернативные держатели оптических элементов с XY-позиционированием, с XY-позиционированием и регулировкой наклона в двух плоскостях, с Z-позиционированием. Сборка позиционеров осуществляется из общедоступных компонент: феламент, винты, гайки, штифты, пружины растяжения. Представленные модели отличаются универсальностью и простотой изготовления методом 3D-печати и будут полезным дополнением в любой оптической лаборатории.

A. V. GOLUBEV, A. N. VDOVENKO
ITMO University, Saint-Petersburg

**DEVELOPMENT OF PLASTIC HOLDERS OF OPTICAL
ELEMENTS WITH POSITIONING IN X, Y, Z COORDINATES
AND INCLINATION IN TWO PERPENDICULAR PLANES**

Alternative optical element holders with XY positioning, with XY positioning and tilt adjustment in two planes, with Z positioning have been developed. The positioners are assembled from commonly available components: felament, screws, nuts, pins, tension springs. The presented models are versatile and easy to manufacture by 3D printing and will be a useful addition to any optical laboratory.

Часто лаборатории сталкиваются с нехваткой времени и оборудования для выполнения поставленного проекта, в оптических лабораториях эти проблемы зачастую взаимосвязаны. Сложность в покупке нужных компонентов, обусловленная долгой доставкой и высокой ценой, побуждает сотрудников лабораторий использовать альтернативные методы для выполнения задуманного эксперимента. Одна из возможностей, которая позволяет сэкономить время и финансы, – моделирование и распечатка недостающих компонентов, этот метод сильно ускоряет постановку эксперимента. Зачастую собственные разработки, которые обычно встречаются в оптических лабораториях, имеют множество недостатков, таких как: качество печати, малые возможности калибровки,

универсальность (разработанные компоненты пригодны только для одной конкретной задачи), сложность в исполнении.

Целью работы является решение проблем, связанных с альтернативной разработкой креплений для оптических элементов, задание единого стандарта компонент. За основу взята стандартная деталь (Galeta), которая используется в нашей лаборатории. Из (рис. 1а) видно, что возможности юстировки ограничены перемещением элемента лишь в одной плоскости, в которой расположена Galeta, при разработке не учтены взаимодействия с металлическими элементами (винты, гайки). Мы предлагаем набор оснасток, состоящий из трёх отдельных элементов, взаимодополняющих друг друга. Исследования показывают, что в таком виде оснастка 1 (рис. 1б) позволяет позиционировать оптический элемент в плоскости XY. Дополнив эту оснастку одним элементом (рис. 1в), мы получаем дополнительные возможности позиционирования, теперь мы можем наклонять плоскость XY (оснастка 2), дополняя оснастку 1 другими элементами, получаем возможность позиционирования вдоль оси Z (оснастка 3, рис. 1г). Разработанные модели не содержат сложных элементов, что значительно упрощает процесс распечатки. Дальнейшее развитие будет происходить в сторону автоматизации калибровки, для большей точности юстировки.

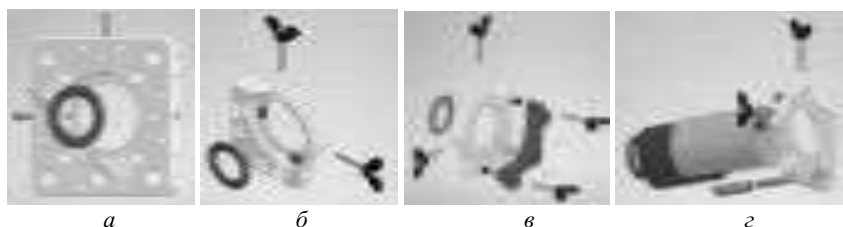


Рис. 1. Крепление для оптических элементов (а), дополненное последовательно тремя видами и оснасток (б) – (г)

Список литературы

1. Delmans M., Haseloff J. μ Cube: A Framework for 3D Printable Optomechanics // Journal of Open Hardware. 2018. V. 2 (1). P. 1-9.
2. Sharkey J.P., Foo D.C.W., Kabla A., Baumberg J.J., Bowman R.W. A one-piece 3D printed flexure translation stage for open-source microscopy // Review of Scientific Instruments. 2016. V. 87. P. 025104.
3. Kintel M. OpenSCAD. 2011. Retrieved December 13, 2017, from OpenSCAD: <http://openscad.org>.
4. Formlabs Printing Lens on the Form1. Retrieved December 13, 2017, from Formlabs: <https://formlabs.com/blog/creating-camera-lenses-withstereolithography/>.

В.И. БУСУРИН, К.А. КОРОБКОВ, Л.Х. ЗО, Ч.Н. АУНГ
*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЙ С ОПТИЧЕСКИМ
СЧИТЫВАНИЕМ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Проведён анализ статической математической модели пьезоэлектрического чувствительного элемента. Исследованы модели без обратной связи и с обратной связью. Проведён расчёт прогиба в зависимости от величины входного ускорения и входного напряжения для различных размеров чувствительного элемента. Диапазон измеряемого ускорения составляет $0 \dots 100 \text{ м/с}^2$.

V.I. BUSURIN, K.A. KOROBKOV, L.H. ZAW, C.N. AUNG
Moscow Aviation Institute (National Research University)

**RESEARCH OF ACCELERATION COMPENSATION
TRANSDUCER WITH OPTICAL READING AND
PIEZOELECTRIC SENSITIVE ELEMENT**

Analysis of a static mathematical model of a piezoelectric sensitive element has been carried out. Models without feedback and with feedback are investigated. Displacement depending on value of input acceleration and input voltage for various sizes of the sensing element was calculated. The measured acceleration range is $0 \dots 100 \text{ m/s}^2$.

В настоящее время одной из основных задач в области создания инерциальных измерителей (в частности, акселерометров) является их микроминиатюризация. Этого можно достичь путём применения оптического считывания, например, в преобразователях ускорений, построенных по технологии микроэлектромеханических систем.

Целью исследования является повышение метрологических характеристик преобразователя ускорений за счёт применения оптического считывания. Предложенный компенсационный преобразователь ускорений с оптическим считыванием и пьезоэлектрическим чувствительным элементом (ЧЭ) построен на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ), имеет квазилинейную статическую характеристику и обладает высокой чувствительностью, что

обеспечивает возможность его применения в системах управления подвижных объектов.

Предлагаемый микро-опто-электромеханический преобразователь ускорений на основе ОТЭ состоит из: ЧЭ; оптического считывающего узла, преобразователя ток-напряжение, усилителя и электронного блока обработки (ЭБО). В качестве ЧЭ использован биморф, один конец которого жестко закреплён к основанию преобразователя, а второй – свободно перемещается. Биморфные пьезоэлектрические элементы используются в качестве актуаторов там, например, где требуются относительно небольшие механические перемещения и большая чувствительность. ЧЭ под действием ускорений испытывает изгибные деформации, которые детектируются оптическим считывающим узлом за счёт изменения отражательной способности модулируемой границы сред, включающим: источник излучения; призму и фотоприёмник (ФП). Значение отражательной способности зависит от зазора между ЧЭ и призмой, длины волны источника и угла падения излучения. Рабочий зазор между ЧЭ и призмой определяет оптическую мощность, достигающую ФП. На основе результатов измерений ЭБО формирует напряжение в контуре обратной связи, подаваемое на пьезоэлектрический ЧЭ, для компенсации его изгиба.

Предложена приближённая модель, по которой можно осуществить расчёт зазора в точке контакта, соответствующей пересечению центрального луча источника излучения с гипотенузой гранью призмы. Для получения более точного результата предложена интегральная оценка отражённой оптической мощности с учётом переменности зазора в области оптического пятна эллиптической формы при изгибе ЧЭ под действием ускорения. Выполнено исследование влияния угла падения и длины волны оптического излучения на функцию преобразования. Исследованы перемещения ЧЭ под действием различных ускорений. Показано, что максимальное отклонение ЧЭ под действием ускорения 100 м/с^2 составляет 170 нм.

Список литературы

1. Бусурин В.И., Коробков К.А., Шлеенкин Л.А. Метод «грубо-точного» считывания для преобразователя ускорения с адаптируемым оптическим модулем // Датчики и системы. 2020. № 8. С. 27-34.

И.Н. ПАВЛОВ, И.Л. РАСКОВСКАЯ, С.А. ШИТОВ, Г.М. ЯНИНА
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУРРЕНТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОЙ РЕФРАКТОГРАФИИ

Приведено описание алгоритма восстановления распределения показателя преломления в переходном слое стратифицированной жидкости при помощи оптического метода лазерной рефрактографии. При помощи рекуррентного метода было проведено восстановление профиля показателя преломления для исследуемого диффузионного слоя жидкости.

I.N. PAVLOV, I.L. RASKOVSKAYA, S.A. SHITOV, G.M. YANINA
National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

APPLICATION OF THE RECURRENT METHOD TO STUDY THE DIFFUSION LAYER USING LASER REFRACTOGRAPHY

A description is given of an algorithm for reconstructing the distribution of the refractive index in the transition layer of a stratified liquid using the optical method of laser refractography. Using the recurrent method, the refractive index profile was reconstructed for the studied diffusion layer of the liquid.

Для восстановления профиля показателя преломления необходимы экспериментальные рефрактограммы, находящиеся на различных фиксированных расстояниях от задней стенки стеклянной кюветы, полученные с помощью метода лазерной рефрактографии [1]. Рис. 1 иллюстрирует принцип работы рекуррентного метода. Зондирование среды с диффузионным слоем происходит наклонным плоским пучком. На модели можно увидеть: плоский непреломлённый пучок на входе в оптическую неоднородность $x_0(y)$, рефрактограмму на выходе из среды $x_1(y)$ и рефрактограмму вне среды на определённом расстоянии от кюветы $x_2(y)$. Продольные сечения рефрактограммы, которые строятся перпендикулярно оси Oy и проходят соответственно через её точки $y = y(N)$ представляют собой траектории лучей с координатами, отмеченными на рисунке. При помощи экспериментальных рефрактограмм на выходе из кюветы и вне среды находится зависимость $\gamma(y)$, так как траектория между данными сечениями представляет собой прямые линии. Так как работа производится в плоскостной структуре

среды, можно сделать вывод, что каждый луч остается в заданном постоянном сечении y , что даёт возможность применять алгоритм восстановления профиля показателя преломления.

Так как известен показатель преломления на границе диффузионного слоя и чистой воды в точке $x_0(y_0)$, то при помощи соотношений, полученных из закона Снеллиуса можно получить значение показателя преломления на выходе в точке $x_1(y_0)$, которая является пересечением луча и задней стенки кюветы. Вследствие того, что все вертикальные координаты экспериментальных рефрактограмм известны, была определена точка, находящаяся на той же высоте, что и точка $x_1(y_0)$, но располагающаяся в плоскости на входе в оптическую неоднородность и лежащая на непреломлённой лазерной плоскости (точка $x_0(y_1)$). Исследуя прохождение второго луча таким же образом, находится значение показателя преломления в точке $x_1(y_1)$. Благодаря вышеописанным действиям получается система рекуррентных соотношений для восстановления зависимости показателя преломления n от вертикальной координаты на основе дискретного набора значений в точках, которые получаются при помощи определения координаты луча на выходе из системы со стратифицированной слоистой жидкостью.

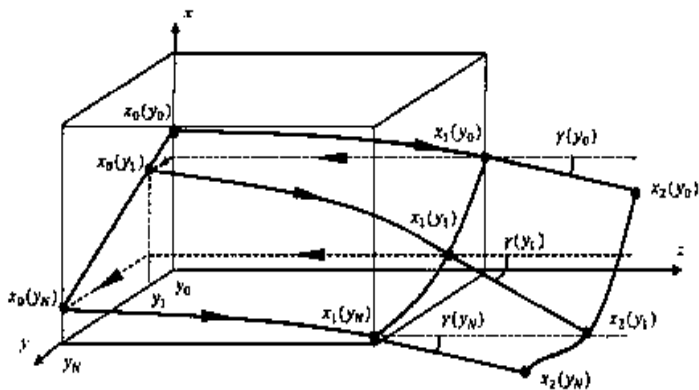


Рис. 1. Геометрические параметры задачи плоского СЛИ при прохождении стратифицированной среды

Список литературы

1. Евтихиева О.А., Расковская И.Л. и др. // XII Межд. науч.-техн. конф. «Оптические методы исследования потоков». 2013.
2. Есин М.В., Расковская И.Л. и др. // Новые радиоэлектронные системы и элементы. 2012. С. 485-491.

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН, В.К. ДМИТРИЕВ

*Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

ТЕПЛОВАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ КАНАЛОВ МОНОБЛОКА ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

В работе рассматривается способ температурной стабилизации каналов оптического контура лазерного гироскопа при тепловой деформации. Минимизация температурного влияния на оптические каналы моноблока лазерного гироскопа обеспечит условия для выполнения эффекта Саньяка и функционирование в рабочем диапазоне температур окружающей среды.

N.A. US, A.A. AVERSHIN, V.K. DMITRIYEV

*Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin», Voronezh*

THERMAL DEFORMATION OF OPTICAL CHANNELS OF THE MONOBLOCK OF THE LASER GYROSCOPE

In work the way of temperature stabilization of channels of an optical contour of a laser gyroscope at thermal deformation is considered. Minimization of temperature influence on optical channels of a monoblock of a laser gyroscope will provide conditions for performance of effect of Sanyak and functioning in the working range of ambient temperatures.

Лазерные гироскопы нашли своё применение на подвижных объектах различного назначения. При эксплуатации лазерного гироскопа его внутренний контур подвержен влиянию температуры от источника излучения. Данное явление приводит к тепловой деформации оптических каналов моноблока лазерного гироскопа

В исследовании рассматривается возможность компенсации тепловой деформации оптических каналов лазерного гироскопа за счёт формирования в конструкции моноблока специальных каналов заданной геометрии заполненных термопастой. Расчёт профиля и геометрии каналов необходимо провести с учётом критических точек оптического контура моноблока и свойств применяемой термопасты.

В качестве ограничения предположим, что изменение температуры в контуре моноблока не зависит от времени, а зависит только от пространственной координаты, тогда имеет место одномерный стационарный процесс теплопроводности (рис. 1).

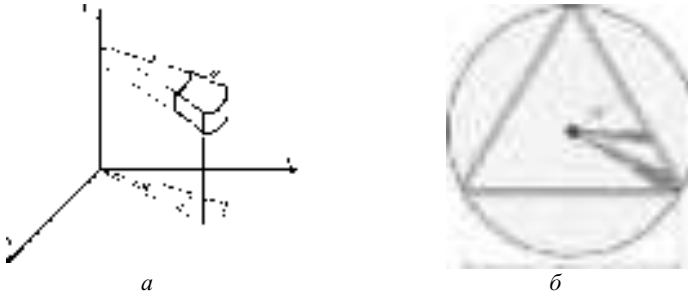


Рис. 1. Канал нагрева в цилиндрической системе координат (а), модель моноблока при применении канала с повышенной теплопроводностью (б)

Используя закон распределения температуры от внутреннего источника, тепловой поток вдоль сектора с радиусом δ_i при достаточном малом угле $d\varphi$ можно найти с помощью закона Фурье для цилиндрической системы координат:

$$q(\delta_i) = \frac{T_1 - T_{\delta_i}}{\ln\left(\frac{\delta_i}{r}\right)} \lambda z d\varphi = \frac{T_1 - T_0}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \lambda z d\varphi, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; z – координата, определяющая толщину сектора канала с повышенной теплопроводностью [1, 2].

Результаты расчётов позволяют определить каналы заполнения теплопроводной пастой, обеспечивающей зональное выравнивание градиента температуры в рабочих зонах от источника излучения с учётом температуры окружающей среды.

Список литературы

1. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н. Способ компенсации теплового изгиба и деформации оптических каналов моноблока лазерного гироскопа. Патент РФ № 2630531. Заявл. 06.04.2016; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 26.

2. Ус Н.А., Задорожний С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н. Способ компенсации теплового изгиба и деформации оптических каналов моноблока лазерного гироскопа. Патент РФ № 2630533. Заявл. 06.04.2016; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 26.

И.Н. АБРОСИМОВ, В.В. КУЗНЕЦОВ

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

**ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТООПТИЧЕСКОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С КРУГОВОЙ СИММЕТРИЕЙ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
ДВИЖЕНИЯ ОПОР ВРАЩЕНИЯ**

Акустооптические взаимодействия с круговой симметрией являются динамическим развитием дифракционных стационарных преобразований излучения на цилиндрических отверстиях. Подобие концентрических акустооптических сигналов в цилиндрическом и коаксиальном резонаторах обеспечивает их волновую совместимость. Волновые поля с круговой симметрией акустических колебаний имеют радиальный градиент показателя преломления и модулей упругости, и могут выполнять динамическое управление фокусным расстоянием оптического излучения и центрирование кинематических опор вращения.

I.N. ABROSIMOV, V.V. KUZNETSOV

MIREA – Russian Technological University, Moscow

**APPLICATION OF THE RESULTS OF ACOUSTO-OPTIC
INTERACTION WITH CIRCULAR SYMMETRY OF SPATIAL
DISTRIBUTION FOR MODULATION OF RADIATION
AND OPTIMIZATION OF THE MOVEMENT OF ROTATION
SUPPORTS**

Acousto-optic interactions with circular symmetry are a dynamic development of diffractive, stationary interactions on round and coaxial holes. Wave fields with circular symmetry of acoustic vibrations have a radial gradient of the refractive index and elastic moduli, and can provide dynamic control of the focal length of optical radiation, centering of the kinematic rotation supports. The ambiguity of these interactions by the similarity of space-time information signal in optical and kinematic elements

Исследования дифракции на стационарных отверстиях, показали высокое пространственное разрешение информационной оптики. Дальнейшее развитие оптики связано с изучением дифракционных структур с различным распределением. Концентрические структуры, отображающие зоны Френеля, показали возможность формирования

волнового фронта, сопоставимого с формируемыми линзовыми и зеркальными системами. Следующим шагом в развитии информационной оптики стало применение различных физических сигналов в том числе и акустических колебаний, для создания устройств активной оптики.

В работах [1, 2] приведены примеры изображения модулированного оптического излучения в сплошном и коаксиальном акустооптических резонаторах, использования вибрационной опоры вращения для центрирования оси вращения пьезопривода типа «гусеница» и принцип динамического центрирования опоры вращения. На рис. 1 изображён пример распределения колебаний.



Рис. 1. Пример распределения колебаний в объёме цилиндрической опоры

Внимание к опорам вращения обусловлено их важной ролью в центрифугах для обогащения и разделения изотопов урана. Использование прецизионных кинематических опор вращения в режиме дискретного динамического центрирования сопровождается уменьшением трения и трибологических шумов.

Акустооптические взаимодействия с осесимметричными распределениями сигналов в цилиндрическом и коаксиальном резонаторах описываются производящими цилиндрическими функциями Бесселя, которые выгодно отличаются от гармонических сигналов по уровню нелинейных искажений и совместимости с круговой симметрией.

Список литературы

1. Абросимов И.Н., Андрущак Е.А., Кузнецов В.В. Волновые процессы совместимые с преобразованиями в активной оптике // С. 639-640.
2. Абросимов И.Н., Евтихийев Н.Н. Способ доводки цилиндрических отверстий во втулках «МИРЭА». S 1433642. БИ № 40.

В.В. ШИПКО^{1,2}

*¹Военный учебный научный центр ВВС «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

²Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

МЕТОДИКА ВЫБОРОЧНОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ КОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗАДАННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ

Представлена методика выбора наиболее информативных спектральных каналов при использовании акустооптического гиперспектрометра в режиме выборочной спектральной регистрации. Разработанная методика позволяет выбрать спектральные каналы, в которых наблюдается максимальный контраст объектов на некотором фоне при условии, что спектральные свойства их известны.

V.V. SHIPKO^{1,2}

*¹Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy
named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin», Voronezh*

²Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

THE METHOD OF SELECTIVE SPECTRAL REGISTRATION OF CONTRAST IMAGES OF SPECIFIED OBJECTS BASED ON TUNABLE ACOUSTO-OPTIC FILTERS

The method of selecting the most informative spectral channels when using an acousto-optic hyperspectrometer in the mode of selective spectral registration is presented. The developed technique allows you to select spectral channels in which the maximum contrast of objects is observed against a certain background, provided that their spectral properties are known.

Реализация выборочной спектральной регистрации при гиперспектральной съёмке осуществима с помощью перестраиваемых АО фильтров [1]. Эти фильтры используют динамические дифракционные решётки, возбуждаемые акустической ультразвуковой волной, и способны осуществлять спектральную фильтрацию световых пучков без существенных искажений переносимых ими изображений.

Цель – разработка методики выбора наиболее информативных спектральных каналов акустооптического гиперспектрометра для контрастной визуализации заданных объектов на заданных фонах.

Методика будет состоять из следующих шагов [2].

Шаг 1. Выбор пары спектров объекта L_n^o и фона L_n^f , где $n = 1, \dots, N$ – номер спектрального канала.

Шаг 2. Вычисление по всем длинам волн λ_n абсолютной величины разности значений спектральной яркости объекта и фона $G_n = |L_n^o - L_n^f|$ и определение массивов локальных максимумов λ_m функции G_n .

Шаг 3. Из найденных длин волн λ_m обеспечивающих максимальные значения G_n выбирается определённое количество λ_p ($p = 1, \dots, P$) по критерию $G_p \geq \varepsilon$, где ε – заданное пороговое значение.

Шаг 4. Сформированное для объектов и фонов множество информативных спектральных точек λ_p используют в зависимости от задачи для формирования (последовательно или одновременно) P частотных сигналов высокочастотного генератора $f_p(\lambda_p)$ для настройки АО фильтра на выбранные длины волн λ_p .

Представленная методика позволяет получить несколько изображений (или одно «полихроматическое» в многооконном режиме), соответствующих наибольшим значениям контраста объекта на фоне из выбранных классов.

На рис. 1 показаны примеры формирования изображения объекта в панхроматическом режиме и монохромного контрастного спектрального изображения полученного по разработанной методике.



Рис. 1. Результат формирования изображений: панхроматическое (а), наиболее информативное спектральное изображение (б)

Список литературы

1. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь 1985.
2. Шипко В.В., Самойлин Е.А., Пожар В.Э., Мачихин А.С. Формирование контрастных изображений заданных объектов акустооптическим гиперспектрометром путём выборочной спектральной регистрации // Оптика и спектроскопия. 2022. Т. 130. № 10. С. 1603-1610.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ, А.Н. ТРОПИН¹
*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения*
¹*АО «НИИ «Гириконд», Санкт-Петербург*

ОТРЕЗАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

Рассматриваются вопросы проектирования фильтров, отсекающих длинноволновую область спектра в диапазоне выше 2 мкм. Описан синтез отсекающих фильтров, в которых излучение блокируется введением в структуру фильтра поглощающих металлических плёнок.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA, A.N. TROPIN¹
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
¹*JSC «Research Institute «Girikond», Saint-Petersburg*

CUTTING-OFF FILTERS FOR THE MID-IRRED RANG OF THE SPECTRUM

The issues of designing filters that cut off the long-wavelength region of the spectrum in ranges above 2 microns are considered. The synthesis of cutting filters is described, in which radiation is blocked by the introduction of absorbing metal films into the filter structure.

Использование интерференционных покрытий обычно требует дополнительных фильтров, блокирующих длинноволновое излучение [1, 2]. В инфракрасной области спектра (ИК) для этого используют поглощающие фильтры или зеркальные интерференционные покрытия. На рис. 1 (кривая 1) приведён спектр пропускания поглощающего фильтра из сапфира толщиной 0,5 мм. Использование таких фильтров приводит, как правило, к увеличению размеров и стоимости, что часто приемлемо.

В настоящей работе описан синтез отсекающих фильтров, в которых ИК-излучение блокируется введением в структуру фильтра поглощающих металлических плёнок. Это позволяет использовать в качестве подложек кремний, который широко используются в оптотехнике, но который пропускает излучение в области выше 1 мкм вплоть до 300 мкм [3].

В работе [4] предложены конструкции отсекающих фильтров для видимой и ближней ИК-областей спектра на основе диэлектрических покрытий и тонких металлических плёнок серебра. Но такие структуры не

пригодны для использования в средней и дальней ИК-области спектра. В работе [5] предложена конструкция узкополосного диэлектрического фильтра, в которой блокирование длинноволнового излучения реализуется за счёт использования тонких поглощающих плёнок никеля.

В данной работе предложена конструкция отрезающего фильтра в средней ИК-области спектра. Исходно используются зеркальные покрытия из четвертьволновых плёнок с высоким и низким показателями преломления [1].

В качестве фильтра использовалось восьмислойное зеркало из четвертьволновых плёнок Ge и SiO на длину волны 8 мкм. Структура зеркала имела вид: $\Pi(2B, 2H)^5$ Воздух, где B – плёнки из Ge, H – плёнки из SiO, Π – подложка из кремния. Единичная толщина плёнки соответствует оптической толщине 2 мкм. Спектр этого зеркала приведён на рис. 1, кривая 2. Далее в структуру зеркала в середину плёнок Ge вводились плёнки никеля оптической толщиной 0,05 мкм. Вся структура оптимизировалась под эталонную структуру. В качестве эталонной выбиралась прямоугольная структура, показанная на рис. 1 (кривая 3). Синтезированная отрезающая структура показана на рис. 1, кривая 4.

Синтезирована структура отрезающего фильтра для среднего ИК-диапазона спектра. Границы структуры на длине волны 3,35 и 7,55 мкм имеют более высокую крутизну по сравнению с абсорбционными фильтрами.

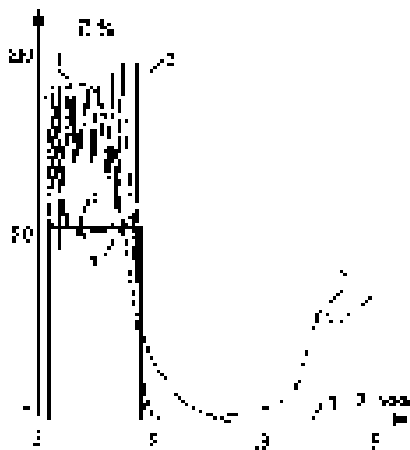


Рис. 1. Спектры пропускания: 1 – пластины сапфира. 2 – исходного зеркала. 3 – эталонного фильтра, 4 – синтезированного отрезающего фильтра

Список литературы

1. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окагова. СПб.: Политехника, 2004.
2. Котликов Е.Н. // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 6. С. 45-47.
3. Котликов Е.Н., Новикова Ю.А. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 5. С. 165-168.
4. Ma P., Lin F., Dobrowolski J.A. // Appl. Opt. 2011. V. 50 (9). P. C201-C209.
5. Котликов Е.Н., Тропин А.Н. // Оптический журнал. 2021. Т. 88, № 9. С. 51-59.

И.С. ДОЛГОПОЛОВ, Е.Ю. АФИНОГЕНОВА, А.В. СЮЙ¹

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

МОДИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ РЕЛЬЕФНОЙ СТРУКТУРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНЫ

Предложена модификация фильтра с применением рельефной периодической структуры переменной глубины с использованием рельефной дифракционной решётки, изменяющейся по линейному закону с целью повышения коэффициента передачи мощности оптического излучения со входа устройства на его выход с увеличенным количеством выделяемых отдельных спектральных линий.

I.S. DOLGOPOLOV, E.Yu. AFINOGENOVA, A.V. SYUY¹

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny*

MODIFICATION OF OPTICAL FILTER BASED ON VARIABLE DEPTH RELIEF STRUCTURE

A modification of the filter is proposed using a relief periodic structure of variable depth using a relief diffraction grating that changes linearly in order to increase the optical radiation power transfer coefficient from the input of the device to its output with an increased number of isolated individual spectral lines.

Оптический фильтр на основе глубокой рельефной структуры переменной глубины предназначен для фильтрации оптического излучения в видимом и ближнем инфракрасном излучении. Ранее уже рассматривался оптический фильтр на основе глубокой периодической рельефной структуры (ГРС) [1]. Далее существующее решение было доработано до фильтра на основе ГРС с переменной глубиной рельефа, что обеспечивало повышение коэффициента передачи мощности оптического излучения с входа устройства на его выход при фильтрации определённых длин волн оптического излучения с изменением не только угла падения входного излучения, но и за счёт дискретного изменения глубины рельефа дифракционной решётки [2]. Недостатком данного решения является ограниченный (дискретный) набор выделяемых

спектральных линий, обусловленный ступенчатым изменением глубины регулярной дифракционной структуры.

Данная проблема может быть решена, если оптический фильтр (рис. 1) будет выполнен с использованием глубокой рельефной структуры переменной глубины, изменяющейся по линейному закону (рис. 2).

Фильтр используется следующим образом. На дифракционную решётку под углом θ в зону с фиксированной глубиной рельефа падает оптическое излучение, которое расположено параллельно линиям рельефа решётки. С помощью заранее рассчитанных показателей фильтра излучение настраивается на рассчитанную частоту.

Преимуществом предложенного решения является то, что глубина дифракционной решётки изменяется по линейному закону, обеспечивая тем самым множество выделяемых отдельных спектральных линий с повышенным коэффициентом передачи мощности оптического излучения.

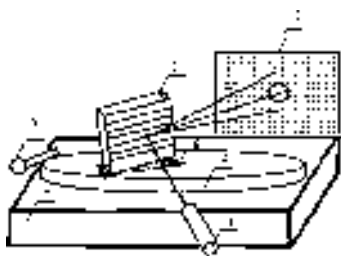


Рис. 1. Схема фильтра спектров оптических сигналов на основе ГРС переменной линейной глубины:
 1 – источник излучения; 2 – рельефная структура переменной глубины, изменяющаяся по линейному закону;
 3 – пространственный фильтр;
 4 – поворотная платформа для регулировки угла падения входного пучка излучения; 5 – механизм поворота платформы; 6 – механизм движения рельефной структуры переменной линейной глубины; 7 – основание

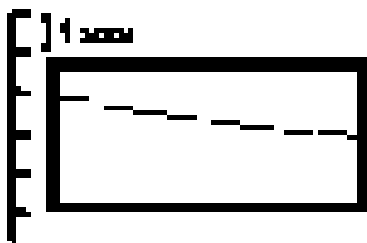


Рис. 2. Схема глубокой рельефной структуры переменной линейной глубины (вид сбоку)

Список литературы

1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М., Суетин Н.В. // Патент России № 181381 U1. 2018.
2. Долгополов И.С., Петрова М.С., Сюй А.В. // Сборник трудов XI Межд. конф. «Фундаментальные проблемы оптики – 2019». Санкт-Петербург, 2019. С. 103-105.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир»

ИНФОРМАТИВНЫЙ ДНЕВНО-НОЧНОЙ МОНОКУЛЯР

Рассматривается дневно-ночной монокуляр, содержащий радиоприёмник для оперативного ввода в поле зрения служебной информации.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
Joint-Stock Company «Moscow Plant «Sapphire»

INFORMATIVE DAY-NIGHT MONOCULAR

A day-night monocular containing a radio receiver for operational input of service information into the field of view is considered.

В настоящее время в технике ночного видения широкое распространение получили дневно-ночные монокуляры (ДНМ) [1], например, прибор ОВ-50 фирмы Sorelem, (Франция). Недостаток прибора – невозможность оперативного ввода в его поле зрения служебной информации. От этого недостатка свободён ДНМ, блок-схема которого представлена на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2.

Фотокатод электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 5 работает в области спектра 0,4 - 0,9 мкм, а его экран – в области 0,53 - 0,56 мкм. Гипотенузная грань куб-призмы 10 пропускает в области 0,53 - 0,56 мкм и отражает в области 0,38 - 0,78 мкм. Дихроичное плоское зеркало (ДПЗ) 11 пропускает в области 0,38 - 0,78 мкм и отражает на рабочей длине волны экрана OLED-дисплея 19 0,63 мкм.

При работе прибора днем первая заслонка 4 закрыта, а вторая заслонка 9 откинута. Свет от Солнца, отражённый от объекта наблюдения и фона, приходит в дневной объектив 10. Он создаёт на сетке 12 перевернутое изображение. При этом свет проходит через ДПЗ 11. Первый линзовый компонент (ЛК) 14 линзовой оборачивающей системы (ЛОС) 13, сфокусированный на сетку 12, с помощью плоского зеркала 16 и второго ЛК 15 создаёт прямое изображение и передаёт его в окуляр 8 через гипотенузную грань куб-призмы 10.

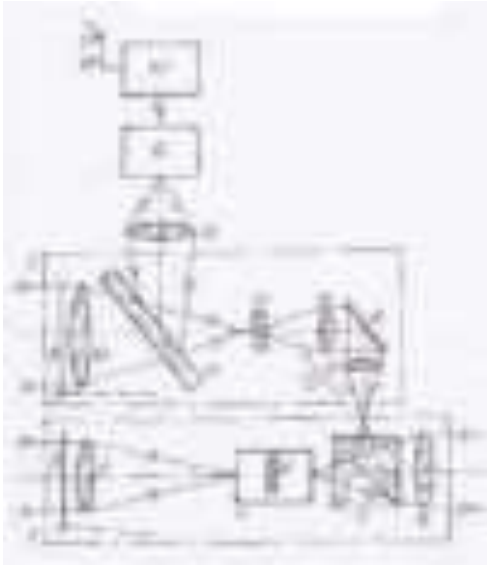


Рис. 1. Блок-схема монокуляра



Рис. 2. Внешний вид монокуляра

При работе ночью первая заслонка *4* открыта, а вторая заслонка *9* закрыта. Излучение звезд и Луны отражается от объекта и фона, приходит в ночной объектив *4*. Он создаёт изображение на фотокатоде ЭОП *5*, преобразуемое в видимое и усиливаемое по яркости с помощью микроканальной пластины (МКП) *6*.

Штыревая антенна *18* воспринимает радиоволновое излучение, несущее в себе оперативно изменяемую служебную информацию. Радиоприёмник *17* преобразует это излучение в видеосигнал, который поступает в OLED-дисплей *19*. Изображение с его экрана с помощью объектива *20* и ДПЗ *11* передается на сетку *12* и наблюдается оператором.

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009.

Я. ДЖАБР, В.А. ПАРФЕНОВ, В.О. ТИШКИН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

3D-ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОДВОДНОГО КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Данная работа посвящена 3D-визуализации подводных объектов культурного наследия под водой. Мы представим Представлен обзор современного состояния в области подводного 3D-сканирования и фотограмметрии. Мы исследовали Рассмотрены особенности подводной 3D-визуализации и математические алгоритмы, которые наиболее эффективны при создании компьютерных 3D-моделей подводных объектов. Также будут представлены предварительные результаты экспериментов по созданию подводных 3D-изображений.

Y. JABR, V.A. PARFENOV, V.O. TISHKIN

Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI»

3D IMAGING OF UNDERWATER CULTURAL HERITAGE

This work is devoted to 3D visualization of underwater objects of cultural heritage under water. We will present an overview of the current state in the field of underwater 3D scanning and photogrammetry. We have studied the features of underwater 3D visualization and mathematical algorithms that are most effective in creating computer 3D models of underwater objects. preliminary results of experiments on the creation of underwater 3D images are presented.

В настоящее время 3D-сканирование и фотограмметрия широко используются в области сохранения культурного наследия с целью документирования памятников. Основным достоинством этих измерительных технологий является возможность оцифровки памятников и фиксации геометрической формы объектов. Однако подводная 3D-визуализация являются новым направлением в применении этих методов, и в научной литературе имеются только разрозненные публикации по этой тематике [1, 2]. Это связано с тем, что сканирование и фотосъёмка в подводных условиях сопряжены с множеством технических поскольку приходится учитывать прозрачность воды, оптическое поглощение и преломление света. По этой причине техника съёмки и алгоритмы, используемые для обработки данных 3D-сканирования в обычных, должны быть адаптированы к условиям съёмки под водой.

Подводное 3D-сканирование началось давно, восходят к 1960-м годам, Однако документирование подводных объектов с помощью 3D-сканирования представляет собой сложную задачу для учёных из-за трудностей в водной среде, таких как рассеяние излучения и поглощение света. Для этого предлагаемые методы должны различаться с точки зрения используемого оборудования, методов и применяемых алгоритмов. Таким образом, методы, изученные в рассмотренной литературе, развивались посредством двух различных подходов: подводной фотограмметрии, которая включала калибровку камеры [1] и моделирование [2]. Другие методы использовались в Skarlatos [3], разработали метод объединения методов компьютерного зрения с подводной фотограмметрией путём объединения 3D-моделирования артефактов, методов калибровки подводной камеры, фототриангуляции с инструментами настройки пучка и автоматического извлечения облака точек для моделирования местности с использованием плотной фотографии и видео. из-за явления преломления, вызванного границами раздела вода-стекло-воздух, Мы выделили один из алгоритмов под названием MLS (Moving Least Square Method) , который основан на PCL (Point Cloud Library) [4]. В предварительном тестировании мы использовали алгоритм MLS для различных доступных подводных облаков точек, и, с нашей точки зрения, он дал наилучшие результаты при реконструкции поверхности. Мы планируем воспроизвести эти тесты на наших собственных полученных облаках точек с использованием 3D оптических и лазерных устройств.

Помимо этого были проведены предварительные эксперименты по 3D-сканированию малогабаритных объектов, помещённых под воду в аквариуме для рыб. Использовался оптический 3D-сканер Range Vision Pro, обеспечивающий точность измерений поверхности объектов около 50 мкм (в обычных условиях). Эти эксперименты подтвердили принципиальную возможность проведения сканирования под водой, однако вопрос о точности измерений пока остается открытым. Для исследования этого вопроса необходимо проведение экспериментов с специально-изготовленными тест-объектами простой геометрической формы, размеры которых известны с высокой точностью. Такого рода исследования станут следующим этапом нашей работы.

Список литературы

1. Fryer J.G., Fraser C.S. On the calibration of underwater cameras. The Photogrammetric Record. 1986.
2. Drap P., Seinturier J., Long L. A photogrammetric process driven by an expert system. 2003.
3. Skarlatos D., Demestha S., Kiparissi S. An 'open' method for 3D modelling and mapping in underwater archaeological sites // Intern. Journal of Heritage in the digital era. V. 201. P. 1-24.
4. Jouvencel B, Xiang X, Zhang L 3D Reconstruction of seabed surface through sonar data of AUVs. 2012. V. 41 (6). P. 509-515.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
АО «Московский завод «Сапфир»

ПСЕВДОБИНОКУЛЯРНЫЙ НОЧНОЙ БИНОКЛЬ С ДНЕВНЫМ КАНАЛОМ

Рассматривается псевдобинокулярный ночной бинокль с ночным и дневным каналом с разводкой изображения на два глаза.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
Joint-Stock Company «Moscow Plant «Sapphire»

PSEUDOBINOCULAR NIGHT BINOCULARS WITH A DAY CHANNEL

A pseudobinocular night binoculars with a night and day channel with an image layout for two eyes is considered.

В настоящее время широко используются псевдобинокулярные и биноклярные ночные бинокли. Они могут работать только ночью [1]. Между тем необходимо круглосуточное наблюдение. Блок-схема нового бинокля дана на чертеже (рис. 1), а его внешний вид показан на рис. 2.

При функционировании днем ЭОП 2 отключён, а работают правый 18 и левый 24 дневные каналы. Свет от Солнца, отразившись от объекта наблюдения и окружающего его фона, приходит в правый дневной объектив 19, правого дневного канала 18. Объектив 19 создаёт перевернутое изображение объекта и фона в плоскости сетки 22. При этом свет последовательно отражается от третьего 20 и четвёртого 21 плоского зеркала. Правый линзовый компонент 23, сфокусированный на сетку 22, находящуюся в задней фокальной плоскости правого дневного объектива 19, передаёт изображение на правый промежуточный объектив 12. При этом свет отражается от правого дихроичного плоского зеркала 10. На выходе первого плоского зеркала 14 в задней фокальной плоскости правого промежуточного объектива 12, совпадающей с передней фокальной плоскостью правого окуляра 16 создается прямое изображение. Оно наблюдается через правый окуляр 16 правым глазом оператора. Аналогичным образом свет от Солнца, отражённый от объекта и окружающего его фона, приходит в левый объектив 25 левого дневного канала 24. Объектив 25 создаёт перевернутое изображение объекта и фона

в своей задней фокальной плоскости, совмещённой с передней фокальной плоскостью левого линзового компонента 28. При этом свет последовательно отражается от пятого 26 и шестого 27 плоского зеркала. Левый линзовый компонент 28 передаёт изображение в левый промежуточный объектив 11. При этом свет отражается от левого дихроичного плоского зеркала 11. На выходе второго плоского зеркала 15 в задней фокальной плоскости левого промежуточного объектива 13 создается прямое изображение, которое наблюдается левым глазом оператора через левый окуляр 17. Таким образом, оператор, работая одновременно правым и левым глазом, наблюдает стереоскопическое изображение. При работе ночью излучение звезд и Луны, определяющее уровень естественной ночной освещённости, отражается от объекта и фона и приходит в ночной объектив 1. Он создаёт изображение объекта и фона на фотокатоде включённого ЭОП 2, который преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Далее работает псевдобинокулярная окулярная система 3. Её проекционный объектив 4 направляет излучение с экрана ЭОП 2 на двугранную призму 5, разделяющее излучение и направляющее его в правую 8 и левую 9 окулярные ветви. При этом в правой окулярной ветви 8 излучение проходит через правое дихроичное зеркало 10, а в левой окулярной ветви – через левое дихроичное плоское зеркало 11. В каждой окулярной ветви 8 (9) промежуточный объектив 10 (11) с помощью первого плоского зеркала 14 (второго плоского зеркала 15) передаёт изображение в переднюю фокальную плоскость окуляра 16 (17) Оператор наблюдает в эти окуляры изображение объекта и фона. Таким образом, устройство может работать и днем, и ночью.



Рис. 1. Блок-схема бинокля



Рис. 2. Внешний вид бинокля

Ю.В. РЫЖИКОВА, С.Б. РЫЖИКОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКТАЛОПОДОБНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены подходы к решению фундаментальной научной задачи, направленной на установление закономерностей, определяющих количественную связь между особенностями структуры дендритов и их спектральными характеристиками. Нахождение характеристик дендритов может использоваться при разработке новых диагностических средств их исследования.

Yu.V. RYZHIKOVA, S.B. RYZHIKOV

Lomonosov Moscow State University

DIAGNOSTIC TOOLS FOR INVESTIGATION OF FRACTAL-LIKE OBJECTS

Approaches for solving a fundamental scientific problem aimed at establishing patterns that determine the quantitative relationship between the features of the structure of dendrites and their spectral characteristics are considered. Finding the characteristics of dendrites can be used in the development of new diagnostic tools for their study.

Фракталоподобные объекты со сложной пространственной структурой нашли применение в различных оптических устройствах. Их совершенствование тесным образом связано с разработкой и улучшением методов диагностики, позволяющих определять качество рассматриваемых объектов [1, 2].

В данной работе на примере решетчатых структур, представляющих собой самоорганизующиеся нанокластерные системы дендритного типа, показана возможность улучшения методов оптической диагностики.

В литературе довольно много публикаций, посвящённых изучению фрактальных особенностей роста структуры дендритных кластеров, например [3 - 5]. Однако работ, относящихся к сопоставлению фрактальных закономерностей дендритных структур и их дифракционных картин недостаточно [6, 7]. Для диагностических приложений полезно установить устойчивую связь между фрактальностью структур нанодендритов и их спектральными характеристиками. Значительно усовершенствовать методы диагностики с точки зрения быстрого

извлечения информации даже в присутствии возмущающих факторов можно, используя элементы паттерного анализа.

На основе теоретических исследований определены особенности скейлинга дендритных структур в световых полях, проявляющиеся в форме устойчивых локальных образований. Рассмотрены общие подходы к решению фундаментальной научной задачи, направленной на установление закономерностей, определяющих количественную связь между особенностями структуры дендритов и их спектральными характеристиками [8]. Предлагаемые модели построения случайных дендритных структур можно использовать для описания первичного этапа формирования процессов структурирования материи, применительно к некоторым биологическим объектам [9]. Кроме того, найденные границы неустойчивости изменения значений фрактальной размерности для различных моделей частица-кластер можно положить в основу выделения локальных областей скейлинга структур центрально-симметричных дендритов. Это позволит выработать более общий подход идентификации дендритных структур и их картин дифракции, включающий, как определение фрактальной размерности, так и локальные параметры скейлинга (коэффициенты и области скейлинга).

Также продемонстрирована устойчивость пространственных фурье-спектров дендритов к изменению их морфологии [10]. Полученные результаты позволяют усовершенствовать методы диагностики.

Список литературы

1. Shanmukha R.Y., et al. // Journal of Clinical and Diagnostic Research. 2015. V.9 (11). P. EC21.
2. Гридчина В.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 12. С. 1691.
3. Nicolás-Carlock J.R., Carrillo-Estrada J.L., Dossetti V. // Scientific reports. 2016. V. 6. P. 19505.
4. Witten T.A., Sander L.M. // Physical Review B. 1983. V. 27. No. 9. P. 5686.
5. Meakin P. Fractals, Scaling and Growth Far from Equilibrium. Cambridge University Press. 1998.
6. Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2018. № 3. С. 69.
7. Ryzhikova Yu., Mukhartova Iu., Ryzhikov S. // Journal of Physics: Conference Series. 2018. V. 1141. P. 012059.
8. Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика, астрономия. 2021. № 5. С. 3.
9. Косырев А.В., Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 1. С. 74.
10. Ружицкая Д.Д., Рыжикова Ю.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2022. Т. 86. С. 902.

Э.И. ИБРАГИМОВА, И.Н. ПАВЛОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Целью работы являлась разработка методики и проведение экспериментальных исследований эффективности индивидуальных средств защиты органов дыхания. С этой целью была разработана и собрана экспериментальная установка, а также программа обработки полученных экспериментальных изображений. Приведены результаты экспериментов по оценке эффективности средств индивидуальной защиты органов дыхания.

E.I. IBRAGIMOVA, I.N. PAVLOV

National Research University MPEI (Moscow Power Engineering Institute)

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF RESPIRATORY ORGANS PROTECTION BY THE OPTICAL METHOD

The aim of the work was to develop a methodology and conduct experimental studies of the effectiveness of individual respiratory protection equipment. For this purpose, an experimental setup was developed and assembled, as well as a program for processing the obtained experimental images. The results of experiments on evaluating the effectiveness of personal respiratory protection equipment are presented.

В настоящее время существует множество инфекций, передающихся воздушно-капельным путём. Высокая скорость распространения инфекций может пагубно влиять на эпидемиологическую обстановку и быть опасным для населения [1]. Маски действуют как физический барьер. Они задерживают аэрозольные частицы, которые образуются при чихании и кашле, благодаря чему в воздух попадает меньше вирусных частиц и опасность инфицирования для окружающих снижается [2]. В данной работе было проведено экспериментальное исследование способности различных видов масок задерживать аэрозольные частицы, а также исследование параметров прошедших частиц. С этой целью была разработана и собрана экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1. В ней с помощью лазерной плоскости визуализировался поток микрокапель, создаваемый механической частью и прошедший сквозь исследуемые маски.

Программа обработки экспериментальных изображений была написана на языке C++ и qml с помощью графического фреймворка Qt [3]. Основные расчёты были проведены с помощью библиотеки opencv [4]. Работу программы можно разделить на два основных этапа, это определение границ капель и расчёт их параметров.

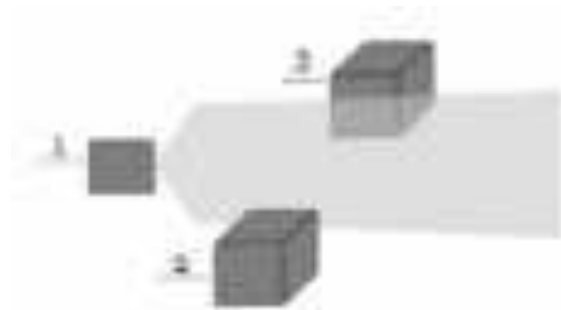


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для оценки средств индивидуальной защиты органов дыхания: 1 – оптическая система для создания лазерной плоскости, 2 – механическая часть установки для имитации процесса чихания, 3 – цифровая камера

В результате работы программы были получены такие данные, как заполненность кадра, что позволяет судить об общем объеме жидкости, прошедшей сквозь маску. Также известно распределение размеров пятен рассеяния отдельных капель.

Таким образом, можно сказать, что наиболее эффективными являются маски-респираторы. Вне зависимости от типа и производителя они показали хорошие результаты. Также хорошие результаты показали маски, изготовленные по ГОСТ Р58396-2019, вискозы, смеси хлопка и полиэстера.

Список литературы

1. Drownick F., et al. // Aerosol Science and Technology. 2021. V. 55 (1). P. 63.
2. URL: <http://rosпотребнадзор.ru>.
3. URL: <https://doc.qt.io/>.
4. URL: <https://docs.opencv.org/>.

В.Г. ЕФРЕМЦЕВ, Н.Г. ЕФРЕМЦЕВ, Е.П. ТЕТЕРИН¹,
П.Е. ТЕТЕРИН², А.Н. МОРОЗИХИН², Е.С. БАЗАВЛУК¹

¹*Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева,
Владимирская обл.*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ДИАГНОСТИКА РАКА ЛЁГКИХ НА ОСНОВЕ КЛАССИФИКАЦИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАММ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ МЕТОДАМИ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ

Представлены результаты метрик классификации снимков компьютерной томографии рака лёгких, полученных при глубоком обучении нейронных сетей нескольких архитектур: DenseNet121, EfficientNetB0 и ConvNeXt по базе данных LUNA16 с предобработкой. Показано, что для классификации наиболее подходит модель DenseNet121.

V.G. EFREMTSEV, N.G. EFREMTSEV, E.P. TETERIN¹,
P.E. TETERIN², A.N. MOROZIKHIN², E.S. BAZAVLUK¹

¹*Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev, Vladimir region*

²*National Research Nuclear University MPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

DIAGNOSTICS OF LUNG CANCER BASED ON THE CLASSIFICATION OF COMPUTED TOMOGRAMS OF THE CHEST USING DEEP LEARNING METHODS

The results of classification metrics for lung cancer CT images obtained by deep learning of neural networks of several architectures: DenseNet121, EfficientNetB0 and ConvNeXt on the LUNA16 database with preprocessing are presented. It is shown that the DenseNet121 model is most suitable for classification.

Среди онкологических заболеваний первое место занимает рак лёгких. Эффективность лечения, которого во многом определяется проведением массовой диагностики, что достигается методами компьютерной томографии (КТ) грудной клетки. Одним из наборов компьютерных томограмм, применяемых при обучении нейронных сетей для диагностики рака лёгких, является открытая база данных LUNA16 [1]. Эти данные содержат 888 снимков КТ, аннотация которых проводилась в два этапа с участием четырёх опытных рентгенологов. Анализ публикаций по LUNA16 [2 - 5] показал, что практическое применение опубликованных результатов затруднительно.

В работе представлены результаты метрик классификации каждого класса, полученных при обучении нейронных сетей нескольких архитектур: DenseNet121, EfficientNetB0 и ConvNeXt. Перед обучением нейросети исходные КТ-снимки прошли предобработку. В состав датасета LUNA16 входит файл candidates.csv. Данные в этом файле представляют собой набор трёх координат, соответствующих центру исследуемого новообразования, имя файла, а также метку класса. Каждый КТ-снимок представляет собой упорядоченный набор слоёв, что позволяет сопоставить координату Z изучаемого образца с номером слоя. После предобработки находится искомая точка центра изучаемого узла. Далее, с центром в этой точке, выбирается окно размером 32 x 32 пикселя, которому в соответствии ставится метка класса. Затем осуществлялась аугментация данных с параметрами: horizontal_flip = True, vertical_flip = True, rotation_range = 7, zoom_range = 0.05. Дисбаланс классов компенсировался посредством применения утилиты sklearn. Эффективность классификации [6] оценивалось метриками: Rrecision, Recall, F1-score и интегральными Roc_auc и Average precision, результаты приаедены в табл. 1.

Таблица 1

Модель	DenseNet121	EfficientNetB0	ConvNeXt
Roc_auc	0,93	0,92	0,85
Average precision	0,94	0,88	0,83

Результаты подтверждают эффективность применения методов глубокого обучения для диагностики рака лёгких по КТ снимкам. Показано, что для классификации наиболее подходит модель DenseNet121.

Модели нейронных сетей реализованы на платформе Tensorflow 2.9.0, также использовались: CUDA 11.2, Scikit-Learn 1.0.2, Numpy 1.21.6, OpenCV 4.5.4, Python 3.7.11, Win 10 . Обучение моделей осуществлялось на графической карте NVIDIA RTX 1080 Ti.

Список литературы

1. Setio A.A.A., et al. // Medical Image Analysis. 2017. V. 42. P. 1-13.
2. Lai K.D., Le T.H., Nguyen T.T. // Proc. 14th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE). 2022. P. 1-5.
3. Balannolla S., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2022. V. 2286. P. 012011.
4. Shafi I., et al. // Cancers. 2022. V. 14 (21). P. 5457.
5. Suresh S., Mohan S. // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. 2022. V. 341. P. 706-1717.
6. Орельен Ж. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем, 2-е изд. СПб., 2020.

А.А. ЖИХОРЕВА, А.В. БЕЛАШОВ, Т.Н. БЕЛЯЕВА¹,
А.В. САЛОВА¹, Е.С. КОРНИЛОВА¹, И.В. СЕМЕНОВА,
О.С. ВАСЮТИНСКИЙ

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
¹Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФАЗОВОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КЛЕТОК В ХОДЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты экспериментов по исследованию изменения оптических и морфологических параметров клеток в ходе фотодинамического воздействия четырьмя разными методами фазовой визуализации: цифровой когерентной голографической микроскопии и томографии, низкокогерентной голографической микроскопии с использованием пространственного модулятора света и метода фазовой визуализации, основанного на восстановлении фазового изображения клеток из серии дефокусированных изображений с помощью уравнения переноса интенсивности. Оценены точность восстановления фазовых изображений и погрешность определения морфологических и оптических параметров клеток в разных состояниях при исследовании их разными методами фазовой визуализации.

A.A. ZHIKHOREVA, A.V. BELASHOV, T.N. BELYAEVA¹,
A.V. SALOVA¹, E.S. KORNILOVA¹, I.V. SEMONOVA,
O.S. VASYUTINSKII

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg

APPLICATION OF FOUR QPI METHODS FOR INVESTIGATION OF OPTICAL AND MORPHOLOGICAL PARAMETERS OF CELLS UNDER PHOTODYNAMIC TREATMENT

We present comparative analysis of four QPI methods for investigation of changes of optical and morphological parameters of cells caused by photodynamic treatment. We applied four different phase imaging methods, in particular digital holographic microscopy and tomography with coherent light sources, low-coherence holographic microscopy using spatial light modulator and phase imaging based on phase image reconstruction from a set of defocused images using the transport of intensity equation.

The accuracy of phase images reconstruction and errors of determination of cellular parameters by these QPI methods were estimated.

Методы фазовой визуализации, позволяющие исследовать внутриклеточные структуры без использования экзогенных красителей, широко применяются для исследования оптических и морфологических параметров клеток в ходе внешнего воздействия на них. Возможность детектировать фазовые изображения клеток при плотности мощности регистрирующего излучения порядка мкВт делают цифровую голографическую микроскопию и томографию малоинвазивными методами исследования. Однако наличие когерентного шума, сложности при эксплуатации установки и восстановлении фазовых изображений делают более привлекательными методы с использованием низкокогерентных источников, которые можно реализовать на широкопольных оптических микроскопах. К таким методам можно отнести численную фазово-контрастную микроскопию и метод, использующий уравнение переноса интенсивности (ТИЕ).

Целью работы является сравнительных анализ точности восстановления фазовых изображений клеток четырьмя методами фазовой визуализации и оценка погрешности определения клеточных параметров из их фазовых изображений. В работе использовались цифровой голографический микроскоп, основанный на интерферометре Маха–Цандера, голографический томографический микроскоп Nanolive 3D Cell Explorer, численная фазово-контрастная микроскопия и ТИЕ метод визуализации, реализованные на базе микроскопа Nikon Ti2A. Исследование проводилось на клетках линии HeLa. Разные пути гибели клеток запускались с помощью фотодинамической терапии с фотосенсибилизатором Радахлорин.

Было показано, что использование низкокогерентных методов исследования, реализованных на коммерческом оптическом микроскопе, позволяют более точно оценить морфологические параметры клеток, такие как площадь проекции и размер ядра клеток. В то время как средний фазовый набег клеток наиболее точно определяется с помощью когерентной цифровой голографической микроскопии. Однако, изменение оптической толщины живых клеток при их гибели путём некроза и апоптоза, определённое четырьмя методами визуализации не отличались в рамках погрешности измерения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

А.А. ЗОЛОТУХИНА^{1,2}, А.С. МАЧИХИН¹, А.В. ГУРЫЛЕВА^{1,2},
В.О. ГРЕСИС³, В.В. ТЕДЕЕВА⁴

¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

³Российский университет дружбы народов, Москва

⁴Владикавказский научный центр РАН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА РАСТЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Описан алгоритм обработки гиперспектральных данных для получения пространственного распределения концентраций хлорофилла. Для апробации алгоритма проведён эксперимент со съёмкой листьев сои сортов различной зрелости акустооптическим видеоспектрометром. В результате была построена карта содержания хлорофилла, среднее значение по которой имеет высокую корреляцию ($R_2 > 0.8$) с полученной анализом образцов концентрацией.

A.A. ZOLOTUKHINA^{1,2}, A.S. MACHIKHIN¹, A.V. GURYLEVA^{1,2},
V.O. GRESIS³, V.V. TEDEEVA⁴

¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the RAS, Moscow

²Bauman Moscow State Technical University

³Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow

⁴Vladikavkaz Scientific Center of the RAS

DETERMINATION OF SPATIAL DISTRIBUTION OF PLANT CHLOROPHYLL CONCENTRATION BASED ON SPECTRAL IMAGE PROCESSING

An algorithm for processing hyperspectral data to obtain the spatial distribution of chlorophyll concentrations is described. To test the algorithm, an experiment was carried out on soybean leaves of varieties of different maturity using an acousto-optic tunable filter spectrometer. As a result, a map of the chlorophyll content was constructed, the average value of which has a high correlation ($R_2 > 0.8$) with the concentration obtained from the analysis of the samples.

Содержание хлорофилла является исчерпывающим показателем физиологического состояния растительности. Широко применяемые спектрофотометрические, фотоколориметрические и флуориметрические

методы [1] не могут обеспечить получение пространственно-временного распределения. В то же время метод гиперспектральной диагностики может стать эффективным способом быстрого и неразрушающего определения хлорофилла *in vivo* [2].

Целью работы является апробация разработанного алгоритма получения карт хлорофилла на основе данных акустооптического видеоспектрометра. Освещённые галогенной лампой листья сои различной скороспелости были размещены в поле зрения на белой пластине с равномерной по полю спектральной характеристикой, близкой к единице во всём диапазоне $\lambda = 450 \dots 800$ нм.

Предварительная обработка полученных спектральных изображений включала, снижение шума и автоматическое определение объекта исследования. Извлечение спектрального коэффициента диффузного отражения проводилось путём деления спектральной плотности яркости излучения на спектральную функцию источника освещения. Помимо нормировки обработка включала учёт коэффициента передачи спектрального прибора. Обработанные данные позволяют получить пространственное распределение вегетационных индексов, которые связаны с концентрацией хлорофилла эмпирическими соотношениями [3].

В результате были получены карты содержания хлорофилла (рис. 1) в листьях сои, средние значения по которым имеют высокую корреляцию ($R^2 > 0,8$) с результатами анализа образцов после регистрации данных видеоспектрометра. Карты содержания хлорофилла могут быть использованы в экомониторинге, прогнозировании чрезвычайных ситуаций и в задачах агропромышленного комплекса.

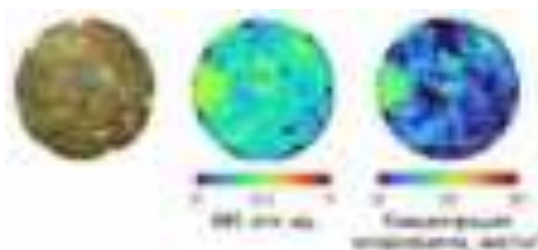


Рис. 1. Цветное изображение (слева), пространственное распределение вегетационного индекса (по центру) и концентрации хлорофилла (справа)

Список литературы

1. Dhanapal A.P., et al. // BMC Plant Biol. BioMed Central Ltd. 2016. V. 16 (1). P. 174.
2. Kanning M., et. al. // Remote Sensing. 2018. V. 10. P. 2000.
3. Ferri C.P. et al. // Brazilian Journal of Plant Physiology. 2004. V. 16. P. 131-136.

А.В. БЕЛАШОВ, А.А. ЖИХОРЕВА, И.В. СЕМЕНОВА,
Я.М. БЕЛЬТЮКОВ

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЛН ДЕФОРМАЦИИ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

В работе представлены результаты детектирования и анализа уединённых волн деформации в твердотельных волноводах, выполненных из полистирола, с помощью цифровой голографии. Анализ спектральных составляющих зарегистрированных продольных волн деформации на фазовых изображениях проводился в нескольких областях твердотельного волновода, соответствующих разным этапам эволюции продольных волн деформации. Полученные данные позволили оценить затухание коротко- и длинноволновых компонент и продемонстрировать гораздо более быстрое затухание высокочастотных волн по сравнению с длиной уединённой волной.

A.V. BELASHOV, A.A. ZHIKHOREVA, I.V. SEMENOVA,
Ya.M. BELTYUKOV

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE EVOLUTION OF LONGITUDINAL STRAIN WAVES IN SOLID WAVEGUIDES USING DIGITAL HOLOGRAPHY AND SPECTRAL DECOMPOSITION

We present the results of detection and analysis of strain solitary waves in solid polystyrene waveguides by means of digital holography. The analysis of spectral components of the detected longitudinal strain waves and their phase images was carried out in several areas of the solid waveguide, corresponding to different stages of strain wave evolution. The data obtained allowed estimating attenuation of the short- and long-wavelength components. The much faster attenuation of high-frequency waves compared to the long solitary wave has been shown.

В последние годы уединённые волны разного типа и связанные с ними нелинейные явления привлекали всё большее внимание и изучались применительно к широкому кругу процессов, в том числе оптике, физике твёрдого тела, физике плазмы и так далее. В частности, в ряде наших предыдущих работ было показано, что детектирование нелинейных

упругих волн в твердотельных волноводах, выполненных из различных полимерных и нанокompозитных материалов, позволяет характеризовать их линейные и нелинейные упругие свойства, а также детектировать деламинацию в склейках из нескольких материалов с разными свойствами [1]. Однако, помимо изучения параметров уже сформировавшихся нелинейных уединённых упругих волн в твердотельных волноводах значительный интерес представляет процесс их образования из исходной ударной волны, генерируемой при лазерно-индуцированном взрывном испарении металлизированного слоя фольги [2].

Для исследования процесса формирования нелинейной уединённой волны в волноводе нами была проведена регистрация фазовых изображений таких волн на различных расстояниях от области генерации ударной волны. Детектирование упругих волн осуществлялось с помощью внеосевой цифровой голографии с использованием непрерывного лазерного излучения на длине волны 532 нм и быстрой камеры с временем экспозиции порядка 100 нс. Поле зрения оптической установки составляло около 65 мм в диаметре. Анализ изменения спектрального состава упругих волн на разных участках волновода показал, что преобладающие в первоначальной ударной волне коротковолновые компоненты достаточно быстро затухают в ходе распространения по волноводу. С другой стороны, малый коэффициент затухания длинноволновых компонент приводит к формированию длинной нелинейной упругой волны, которая становится отчётливо различима уже на расстоянии 50 - 65 мм от начала волновода. Также нами был проведён анализ зависимости спектрального состава упругих волн от энергии исходной ударной волны, контролируемой путём изменения площади взрывного испарения металлизированного слоя. Полученные результаты показали, что вклад коротко- и длинноволновых компонент в формируемую упругую волну резко изменяется при превышении определённого порога энергии ударной волны. На наш взгляд это может свидетельствовать о существовании пороговой энергии, необходимой для успешного формирования длинной уединённой волны деформации в нелинейно-упругом волноводе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-72-10083.

Список литературы

1. Belashov A.V., et al. Indirect assessment of bulk strain soliton velocity in opaque solids. *Applied Physics Letters*. 2018. V. 112 (12), P. 121903,
2. Garbuzov F., et al. Shock wave evolution into strain solitary wave in nonlinearly elastic solid bar. *Wave Motion*. 2022. V. 114. P. 103022.

Н.А. НЕСТЕРОВ, Г.К. КОСТЮК, А.А. ПЕТРОВ, В.А. ШКУРАТОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ
ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИСЛАНДСКОМ ШПАТЕ
ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГАУССОВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНТЕНСИВНОСТИ**

Приведены результаты по формированию фазовых оптических элементов (ФОЭ) на исландском шпате технологией лазерно-индуцированной микроплазмы (ЛИМП). Также приведены результаты контроля качества поверхности ФОЭ, профиля глубин его травления и эффективность преобразования энергии ФОЭ. Выполнено тестирование ФОЭ в схеме с наносекундным лазером с $\lambda = 1064$ нм. Результаты тестирования показали возможность применения ФОЭ для преобразования Гауссова пучка в пучок заданной формы с заданным распределением интенсивности.

N.A. NESTEROV, G.K. KOSTYUK, A.A. PETROV,
V.A. SHKURATOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

**MANUFACTURING AND TESTING
OF PHASE OPTICAL ELEMENTS ON ICELANDIC SPAR
FOR THE TRANSFORMATION
OF GAUSSIAN INTENSITY DISTRIBUTION**

The results on the manufacturing of phase optical elements (POE) on Icelandic spar by laser-induced microplasma (LIMP) technology are presented. The results of the quality control of the surface of the POE, the profile of the depths of its etching and the efficiency of the conversion of the energy of the POE are also presented. The POE was tested in a scheme with a nanosecond laser with $\lambda = 1064$ nm. The results of the testing showed the possibility of using the POE to transform a Gaussian beam into a beam of a given shape with a given intensity distribution.

В последние годы одним из перспективных направлений исследований является преобразование Гауссова пучка в оптические поля, с заданными распределениями интенсивности по сечению пучка, распределением вектора поляризации и формой волнового фронта [1, 2]. Специальные оптические поля находят самое широкое применение в различных высокотехнологических областях [3], например, в лазерной микро- и

нанообработке материалов для повышения её качества [4, 5]. Для создания таких полей в основном применяются пространственные световые модуляторы (ПСМ) [6]. Однако ПСМ являются сложными устройствами, базирующимися на массивах жидких кристаллов, для применения которых требуется кодировка в специализированном программном обеспечении [7]. Кроме того, низкий порог разрушения жидких кристаллов ограничивает применение ПСМ с высокомоощными лазерными пучками [8].

В настоящей работе мы предлагаем использовать фазовые оптические элементы (ФОЭ), изготовленные на поверхности исландского шпата (одноосного двулучепреломляющего кристалла с кристаллической осью, ориентированной параллельно поверхности пластин) для преобразования гауссова пучка в специальное оптическое поле. Мы использовали технологию лазерно-индуцированной микроплазмы для структурирования прозрачных диэлектриков, в этом случае ФОЭ могут быть выполнены травлением областей любой формы, на заданную глубину, обеспечивающую строго определённый фазовый сдвиг и тем самым задающей форму и распределение интенсивности по сечению лазерного пучка. Это реализуется при ориентации вектора линейной поляризации под углом 45° к направлениям главных осей ФОЭ.

Качество изготовленных ФОЭ исследовалось с применением контактного профилометра с ошибкой измерения ± 10 нм и оптического микроскопа. Тестирование изготовленных ФОЭ осуществлялось в экспериментальной установке с наносекундным лазером с $\lambda = 1064$ нм. Для оценки эффективности конверсии энергии проводились измерения мощности падающего на ФОЭ пучка и пучка на выходе из него.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ФОЭ изготовленные на исландском шпате способны преобразовывать гауссов пучок в специальное оптическое поле, являются перспективным в лазерной микрообработке материалов с высокой эффективностью конверсии энергии (до 80 %).

Список литературы

1. Liu S., et al. // *Photonics Research*. 2018. V. 6. No. 4. P. 228-233.
2. Zheng H., et al. // *Optics Communications*. 2010. V. 283. No. 7. P. 1394-1396.
3. Chen M., et al. // *Opt. Lett.* 2013. V. 38. No. 22. P. 4919-4922.
4. Hnatovsky C., et al. // *Opt. Lett.* 2012. V. 37. No. 2. P. 226-228.
5. Kostyuk G.K., et al. // *Opt. Laser. Technol.* 2022. V. 152. P. 108161.
6. Ouyang J. et al. // *Optics Express*. 2015. V. 23. No. 10. P. 12562-12572.
7. Tang Y., et al. // *Micromachines*. 2021. V. 12. No. 4. P. 376.
8. Beck R.J., et al. // *Optics Express*. 2010. V. 18. No. 16. P. 17059-17065.

О.Л. АФАНАСЬЕВА, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ¹, Т.З. МИНИХАНОВ¹,
А.Б. СОЛОМАШЕНКО, М.В. ШИШОВА

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК С РАЗЛИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ РЕЛЬЕФА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Проведено численное моделирование дифракционных решёток с синусоидальным и прямоугольным профилями, а также профилем типа наклонной трапеции для анализа дифракционной эффективности и угловой селективности и определения оптимальных параметров для использования в волноводах устройств дополненной реальности.

O.L. AFANASEVA, E.Yu. ZLOKAZOV¹, T.Z. MINIKHANOV¹,
A.B. SOLOMASHENKO, M.V. SHISHOVA

Bauman Moscow State Technical University

¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

MODELING AND STUDY OF DIFFRACTION GRATINGS WITH DIFFERENT RELIEF PROFILES FOR AUGMENTED REALITY DEVICES

Numerical modeling of diffraction gratings with a sinusoidal, rectangular and inclined trapezoid profile has been carried out to analyze the diffraction efficiency and angular selectivity and determine the optimal parameters for use in augmented reality devices.

В работе проведён анализ дифракции излучения на бинарной одномерной решётке с синусоидальным, прямоугольным и наклонным профилями рельефа для ТЕ- и ТМ-поляризаций падающей волны в плоскости, перпендикулярной штрихам решётки на основе метода RCWA [1, 2]. Целью данной работы является повышение дифракционной эффективности решёток для ввода и вывода излучения в системах дополненной реальности на основе волноводов, работающих с полихроматическим излучением в широком рабочем угловом поле, то есть без выраженной спектрально-угловой селективности.

Диапазон периодов d для исследования составлял от 300 до 600 нм, высота поверхностного рельефа – от 0 до $1.2d$, углы наклона передней и

задней стенки профиля – от 10 до 50°. В ходе моделирования (рис. 1) выявлено, что особенностью симметричного рельефа является идентичное распределение дифракционной эффективности (ДЭ) от угла падения и длины волны для -1 -го и $+1$ -го дифракционных порядков, а максимальная ДЭ может достигать 80 % при соотношении глубина/период решётки более 1.2.

В случае асимметричных рельефов особенностью является асимметричность распределений ДЭ от угла падения (в пределах от -40 до $+40$ °) и длины волны, выраженная угловая селективность $+1$ -го порядка. Величина ДЭ свыше 80 % может быть достигнута при соотношении глубина/период решётки более 0.6 при угле наклона трапецеидального профиля рельефа более 20°. Таким образом, применение наклонных дифракционных решёток позволяет повысить среднюю ДЭ более чем в 1.5 раза по сравнению с прямоугольными дифракционными решётками.

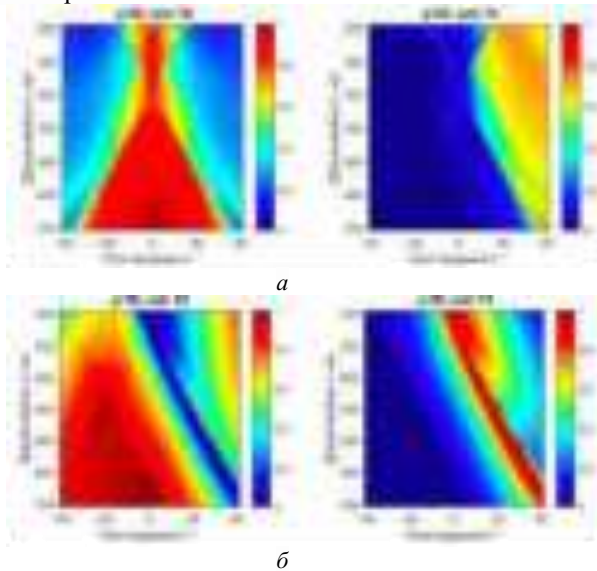


Рис. 1. Спектрально-угловые диаграммы 0-го (слева) и $+1$ -го (справа) порядков: прямоугольный профиль $d = 400$ нм, $h = 400$ нм (а), наклонный профиль $d = 400$ нм, $h = 400$ нм, углы наклона 35° и 16° (б)

Список литературы

1. Moharam M.G., Grann E.B., et. al. // J. Opt. Soc. Am. 1995. A 12. P. 1068-1076.
2. Moharam M.G., Grann E.B., et. al. // J. Opt. Soc. Am. 1995. A 12. P. 1077.

Е.С. МУСИХИНА, С.А ИВАНОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

СОЗДАНИЕ ВОЛНОВОДА ДЛЯ СИСТЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ФОТОТЕРМОРЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

В работе была записана волноводная система ввода и вывода излучения для систем дополненной реальности. Ввод и вывод осуществлялся с помощью наклонных пропускающих объёмных брэгговских решёток. Работоспособность системы была успешно продемонстрирована.

E.S. MUSIKHINA, S.A. IVANOV
ITMO University, Saint-Petersburg

AUGMENTED REALITY SYSTEM WAVEGUIDE ON PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS

In the present work the input-output waveguide system for the augmented reality systems was recorded. Input and output waws realized via slanted transmission volume Bragg gratings. Performance of the system was successfully tested.

В настоящее время в коммерчески доступных устройствах дополненной реальности в основном используется ввод и вывод излучения с помощью призм, зеркал либо рельефных или голографических решёток на фотополимерах [1]. Однако использование призм и зеркал увеличивает вес системы, что делает устройство малоприспособным для длительного ношения. Использование решёток на фотополимерах, наоборот, уменьшает вес и габариты системы, но накладывает ограничения на условия использования устройства ввиду высокой гигроскопичности полимерных материалов и низкой физической прочности. Соответственно, необходим голографический материал, не требующий дополнительной защиты. Для записи голографических решёток волноводного ввода и вывода излучения можно использовать фототерморефрактивное (ФТР) стекло, имеющее в составе около 70 % оксида кремния, которое является достаточно твёрдым и стойким к физическим и химическим воздействиям голографическим материалом.

Таким образом, целью данной работы является запись системы ввода и вывода излучения в волноводе на ФТР-стекле. Для записи решёток использовалось непрерывное излучение He-Cd лазера с длиной волны

325 нм. Длина волны, на которой проводилась оценка дифракционной эффективности элемента, – 532 нм.

В результате работы была рассчитана и записана система ввода и вывода излучения в волновод на базе объёмных брэгговских решёток в ФТР-стекле. Была собрана схема записи решёток с учётом особенности волноводного распространения излучения. (рис. 1) Области ввода и вывода излучения содержат по одной решётке.

Расчёт и запись системы были произведены для источника излучения с центральной длиной волны 520 нм. Эффективность системы составила 0,5 % при ширине спектра 30 нм, тогда как при использовании монохроматического света эффективность решёток достигала 60 %.

Работоспособность системы была подтверждена с использованием лазерного источника с длиной волны 532 нм; также работоспособность системы была проверена при помощи DLP-проектора. Успешно получилось передать изображение сетки, изображение в обесцвеченном волноводе наблюдалось при дневном освещении (рис. 2).

В дальнейшем возможно увеличить количество решёток на образце, чтобы увеличить размер выводимого изображения по одной координате (вдоль волновода).



Рис. 1. Схема записи элемента



Рис. 2. Изображение с DLP-проектора, полученное при помощи волновода

Список литературы

1. Kress B.C., Chatterjee I. Waveguide combiners for mixed reality headsets: a nanophotonics design perspective // Nanophotonics. 2021. V. 10. No. 1. P. 41-74.

Д.С. РАСТРЫГИН, В.О. ДОЛГИРЕВ, С.Н. ШАРАНГОВИЧ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФПМ ДИФРАКЦИОННЫЕ СТРУКТУРЫ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПЕРИОДОМ

В данной работе экспериментально продемонстрировано увеличение ширины вида селективного отклика, дифрагированного пучка методом изменения периода записываемых голографических дифракционных структур и их мультиплексирования.

D.S. RASTRYGIN, V.O. DOLGIREV, S.N. SHARANGOVICH
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

MULTIPLEXED HOLOGRAPHIC PPM DIFFRACTION STRUCTURES WITH VARIOUS PERIOD

An increase in the width of the type of selective response of a diffracted beam in this work is experimentally demonstrated by changing the period of recorded holographic diffraction structures and multiplexing them.

Ранее в работах [1, 2] была продемонстрирована возможность увеличения ширины селективного отклика при помощи мультиплексированных голографических дифракционных структур (ГДС) и чирпированных ГДС. Целью же данной работы является экспериментальное исследование дифракционных характеристик мультиплексированных чирпированных ГДС, сформированных в ФПМ.

Образец состоял из одной ФПМ-плёнки «Вауфол НХ 200» производства компании «Geola» с толщиной слоя 16 ± 2 мкм и защитной плёнки 40 ± 1 мкм. Запись осуществлялась на длине волны 633 нм двумя пучками с апертурой 2 мм и мощностью по 0.9 мВт, падающими под углами $\theta_i = \pm 10^\circ$ и временем записи $t = 25$ с. Для чирпированной мультиплексированной ГДС было последовательно записано две голограммы под углами $\psi = -5; 5^\circ$ и временем записи $t_1 = 3$ с, $t_2 = 25$ с.

На рис. 1 и 2 приведены нормированные относительно максимального значения зависимости дифракционной эффективности от угла поворота образца для одиночной и чирпированной ГДС, а также для мультиплексированной чирпированной ГДС.

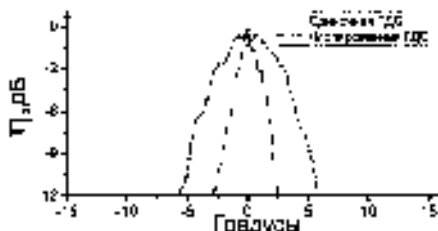


Рис. 1. Угловая селективность одиночной и chirpированной ГДС

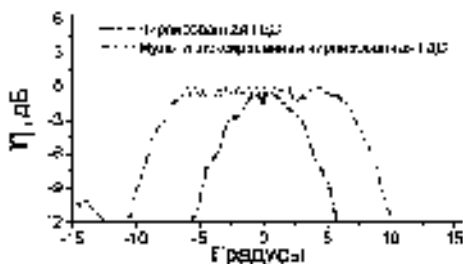


Рис. 2. Угловая селективность chirpированной и мультиплексированной chirpированной ГДС

Как видно из рис. 1, для chirpированной ГДС происходит увеличение ширины селективного отклика в 2 раза по сравнению с обычной ГДС, что обусловлено влиянием изменяющегося периода структуры. Из рис. 2 следует, что в результате дифракции света на мультиплексированной chirpированной ГДС происходит увеличение селективного отклика ГДС в 2,5 раза по сравнению с обычной chirpированной ГДС.

Таким образом, запись мультиплексированных chirpированных ГДС позволяет достичь ещё большего увеличения ширины угловой селективности, что приводит к расширению дифракционных характеристик стандартных однослойных ГДС.

Список литературы

1. Шарангович С.Н. и др. // Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «НС ТУСУР». 2009. С. 273-276.
2. Семкин А.О., Шарангович С.Н. // Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». 2015. Т. 1 (1). С. 171-177.

А.В. МАКАРЕВИЧ, В.Н. НАВНЫКО, С.М. ШАНДАРОВ¹

*Мозырский государственный педагогический университет
им. И.П. Шамякина, Беларусь*

¹*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники*

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШАННЫХ ГОЛОГРАММ В КРИСТАЛЛЕ $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ПРОИЗВОЛЬНОГО СРЕЗА

Представлены результаты теоретического анализа по изучению максимальной эффективности дифракции света на фазово-амплитудных голографических решётках, сформированных в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ произвольного среза. Установлено, что наибольшие значения дифракционной эффективности смешанных голограмм в этом кристалле могут быть достигнуты только при всевозможных вариациях его ориентационного угла, в отличие от случая фазовых голограмм в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$.

A.V. MAKAREVICH, V.N. NAUNYKA, S.M. SHANDAROV¹

Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus

¹*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*

DIFFRACTION EFFICIENCY OF MIXED HOLOGRAMS IN A $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ CRYSTAL OF AN ARBITRARY CUT

The results of a theoretical analysis on the study of the maximum efficiency of light diffraction by phase-amplitude holographic gratings formed in a $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ crystal of arbitrary cut are presented. It has been established that the highest values of the diffraction efficiency of mixed holograms in this crystal can be achieved only with all possible variations of its orientation angle, in contrast to the case of phase holograms in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ and $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ crystals.

В [1, 2] было показано, что достижение максимальных поляризационно оптимизированных поверхностей дифракционной эффективности η^{\max} фазовых голограмм, сформированных в фоторефрактивных кристаллах семейства силленитов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO) и $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ (BGO) произвольного среза, возможно при вариациях их ориентационных углов θ в пределах от 0 до 180°. Аналогичные поверхности η^{\max} могут быть также получены и при выборе θ из диапазона от 180 до 360°. Однако, как было установлено в результате проведённого теоретического анализа, в случае смешанных

голографических решёток, формируемых в кристалле класса силленитов $\text{Vt}_{12}\text{TiO}_{20}$ (ВТО) такая поверхность может быть реализована только при изменении его угла θ в пределах от 0 до 360° . Подтверждением этому служат представленные на рис. 1 указательные поверхности η^{\max} , полученные при вариациях θ от 0 до 180° (рис. 1а), от 180° до 360° (рис. 1б), а также от 0 до 360° (рис. 1в). Направление отсчёта ориентационного угла кристалла соответствовало [3], а его физические параметры соответствовали [4]. Толщина кристалла выбиралась равной 13.7 мм.

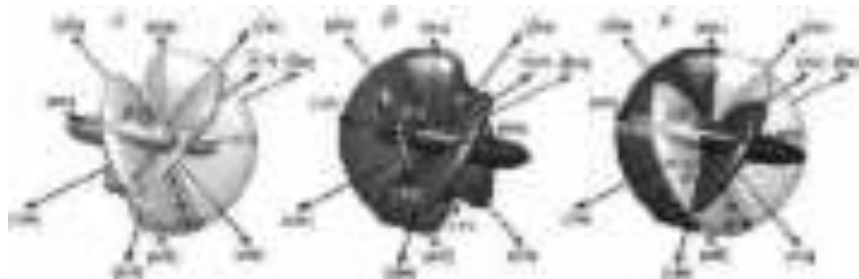


Рис. 1. Указательные поверхности значений η^{\max} смешанных голограмм в кристалле ВТО: при $\theta \in [0; 180^\circ]$ (а); при $\theta \in [180; 360^\circ]$ (б); при $\theta \in [0; 360^\circ]$ (в)

Как видно из результатов теоретического анализа, представленная на рис. 1в указательная поверхность включает в себя наибольшие значения дифракционной эффективности голограмм и содержит все элементы внутренней симметрии кристалла ВТО, причём значения η^{\max} во всех симметрично эквивалентных кристаллических срезах оказываются равны между собой. Полученные результаты должны быть приняты во внимание при выборе значений среза и ориентационного угла кристалла ВТО для его эффективного использования в практических приложениях при диффузионном режиме формирования голографических решёток.

Список литературы

1. Шепелевич, В.В. Голография в фоторефрактивных оптически активных кристаллах. Минск: Изд. центр БГУ, 2012.
2. Deliolanis N.C., Kourmoulis I.M., Apostolidis A.G., Vanidhis E.D., Papazoglou D.G. // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. No. 5. P. 056602.
3. Макаревич А.В., Шепелевич В.В., Навыко В.Н., Аманова М.А., Шандаров С.М. // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 5. С. 769-775.
4. Zagorskiy A.E., Shepelevich V.V., Nichiporko S.F., Egorov N.N., Hu Yi, Ringhofer K.H., Shamonina E. // Opt. Mat. 2001. V. 18. No. 1. P. 131-133.

В.О. ДОЛГИРЕВ, С.Н. ШАРАНГОВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ
УПРАВЛЯЕМЫМИ МНГДС НА ОСНОВЕ КПЖК**

В данной работе продемонстрированы поляризационные характеристики дифрагированного светового поля с помощью численного моделирования, основываясь на модели дифракции произвольно поляризованных световых пучков на электрически управляемых многослойных неоднородных голографических дифракционных структурах, сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах.

V.O. DOLGIREV, S.N SHARANGOVICH

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**TRANSFORMATION OF POLARIZATION
CHARACTERISTICS OF LIGHT BEAMS BY ELECTRICALLY
CONTROLLED MHDS BASED ON PDLC**

In this paper, the polarization characteristics of the diffracted light field are demonstrated using numerical simulation based on the diffraction model of arbitrarily polarized light beams on electrically controlled multilayer inhomogeneous holographic diffraction structures formed in polymer encapsulated nematic liquid crystals.

Как было показано в ранее работах [1, 2], при электрическом воздействии на дифракционные слои многослойной неоднородной голографической дифракционной структуры (МНГДС), состоящей из набора дифракционных решёток, сформированных в капсулированных полимером нематических жидких кристаллах (КПЖК), появлялась возможность динамически управлять угловой селективностью таких структур. Например, изменять не только уровень дифракционной эффективности (ДЭ), но и трансформировать вид угловой селективности.

Однако, в данных работах рассматривался случай дифракции, при котором падающий пучок имел поляризацию, совпадающую с поляризацией собственных необыкновенных волн для КПЖК слоёв. В данной работе, на основе модели дифракции света на МНГДС с КПЖК [1, 2], с помощью численно моделирования продемонстрировано преобразование поляризационных характеристик дифрагированного

светового поля при считывании световым пучком, имеющего произвольную поляризацию. Для численного расчёта использовалась двухслойная голографическая дифракционная структура (ГДС) при воздействии электрического поля на все дифракционные слои. При моделировании использовались следующие параметры: $d_n = 20$ и $t_n = 160$ мкм, $\lambda = 1550$ нм, $E = 1.2E_c$.

Как показано на рис. 1, при считывании двухслойной ГДС световой волной с линейной поляризацией при углах поляризации $\theta_n = \{30, 60, 90\}$ градусов происходят изменения ДЭ (η), азимута (χ) и эллиптичности (ρ) для дифракционного светового поля.

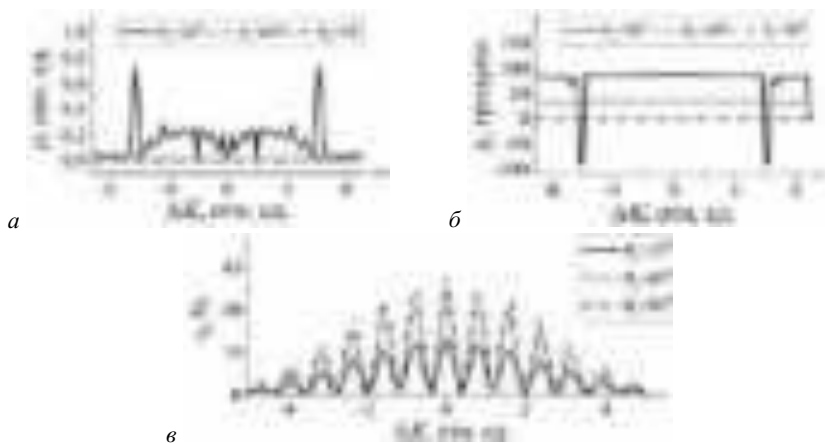


Рис. 1. Распределение эллиптичности (а), азимута (б) и ДЭ (в) дифрагированного светового пучка от фазовой расстройки

В пределах огибающей контура селективности (от -5 до 5 отн. ед. фазовой расстройки) поляризация может трансформироваться с линейной до эллиптической (рис. 1а) при значении эллиптичности до уровня 0.28, а значение азимута практически однородно и изменяется в пределах от 0 до 90° (рис. 1б). Уровень ДЭ (рис. 1в) также может изменяться вследствие влияния поляризации падающего излучения на амплитуду результирующей световой волны.

Список литературы

1. Шарангович С.Н., Долгирев В.О. // Известия ВУЗов. Физика. 2022. Т. 65 (8). С. 10-18.
2. Dolgirev V.O., Sharangovich S.N. // Bill. RAS. Phys. 2022. V. 86 (1). P. 18-23.

М.А. АМАНОВА, В.Н. НАВНЫКО¹

Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, Ашхабад
¹*Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина,*
Мозырь, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА ДИФРАКЦИОННУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГОЛОГРАММ

Представлены результаты теоретических исследований зависимости дифракционной эффективности пропускающих голограмм, сформированных в образце фоторефрактивного кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, от значений ориентационного угла, оптической активности кристалла и его толщины. Показано, что при изменении знака оптической активности кристалла имеет место смещение максимумов дифракционной эффективности относительно значений ориентационного угла.

М.А. AMANOVA, V.N. NAUNYKA¹

Institute of Telecommunications and Informatics of Turkmenistan, Ashgabat
¹*Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin, Belarus*

INFLUENCE OF OPTICAL ACTIVITY ON THE DIFFRACTION EFFICIENCY OF HOLOGRAMS

The results of a theoretical study of the dependence of the diffraction efficiency of a transmission hologram formed in a sample of a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ photorefractive crystal on the values of the orientation angle and optical activity of the crystal are presented. It is shown that with a change in the sign of the specific rotation of the crystal, there is a shift of the maximums of diffraction efficiency relative to the values of the orientation angle.

Зависимости дифракционной эффективности η голограмм, записанных в кристаллических пластинках $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ толщиной $d = 3,45$ мм, от величины ориентационного угла θ и оптической активности ρ кристалла представлены на рис. 1. При $d = 3.45$ мм (рис. 1а), если $\rho > 0$ имеет место смещение локальных максимумов зависимостей 3 и 4 вправо. Если же удельное вращение принимает отрицательные значения ($\rho < 0$), то можно наблюдать «зеркальное отражение» этих зависимостей относительно $\theta = 0$ (рис. 1б). При необходимости изменить знак удельного вращения на противоположный можно используя эффект Фарадея [1].

Удельное вращение плоскости поляризации разных образцов кристалла $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, действительно, может быть различно. В частности, это связано с тем, что при легировании кристаллов в процессе

выращивания добавление различных допантов (Cu, Fe) может обусловить значительное изменение удельного вращения кристалла. Поэтому исследование одновременного влияния пьезоэффекта, фотоупругости и удельного вращения кристалла может оказаться полезным, и полученные результаты найдут применение в целях предварительного выбора параметров при практическом решении задачи оптимизации выходных энергетических характеристик голограмм. Представляет практический интерес и обнаруженное смещение локальных максимумов дифракционной эффективности голограмм при изменении знака удельного вращения кристалла.

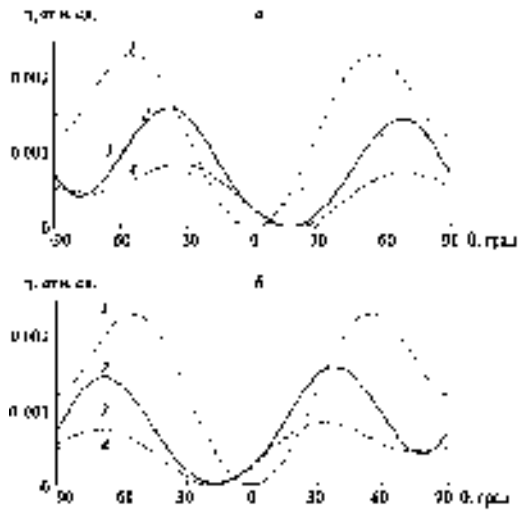


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности η голограмм, сформированных в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ толщиной 3,45 мм, от ориентационного угла θ и значения оптической активности ρ кристалла: без изменения знака удельного вращения, $\rho > 0$ (а); с изменением знака удельного вращения на противоположный, $\rho < 0$ (б); 1, 2 – $\rho = 0$; 3, 4 – $\rho = 0,405$ рад/мм; 1, 3 – с учётом пьезоэффекта; 2, 4 – без учёта пьезоэффекта

Список литературы

1. Шепелевич В.В., Ропот П.И. Способ считывания пропускающей голограммы, записанной в кубическом оптически активном фоторефрактивном кристалле со структурой силленита в диффузионном режиме. Патент № 13572 Республики Беларусь. Заявл. 18.01.2008.; опубл. 30.08.2010. // Официальный бюлл. Нац. центр интеллектуал. собственности. 2010. № 4. С. 146.

А.В. АРХИПОВ¹, Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹,
Д.А. ИЛЬЮШИНА¹, И.А. МАУРЕР

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЛЬЕФНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЁТОК НА СОДЕРЖАЩИХ ЖЕЛАТИН СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛАХ

Приведены результаты экспериментального исследования методами атомно-силовой микроскопии рельефа поверхности высокочастотных (1200 - 1500 мм⁻¹) рельефно-фазовых голографических решёток на содержащих желатин фотоматериалах ПФГ-04 на основе бихромата и галоидосеребряной фотоэмульсии ПФГ-01. Исследования подтверждают рельефный характер получаемых высокочастотных решёток с высотой рельефа порядка 0,2 - 0,5 мкм.

A.V. ARKHIPOV¹, N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹,
D.A. ILYUSHINA¹, I.A. MAURER

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

ATOMIC FORCE MICROSCOPY FOR THE ANALYSIS OF RELIEF HOLOGRAPHIC GRATINGS ON GELATIN-CONTAINING PHOTOCSENSITIVE MATERIALS

The results of an experimental study of the surface relief of high-frequency (1200 - 1500 mm⁻¹) relief-phase holographic gratings on gelatin-containing photographic materials PFG-04 based on dichromate and silver halide photo emulsion PFG-01 using atomic force microscopy are presented. Studies confirm the relief character of the obtained high-frequency gratings with a relief height of about 0.2 - 0.5 microns.

В основе технологии получения высокочастотных рельефно-фазовых структур на светочувствительных материалах на основе желатина ПФГ-01 и ПФГ-04 (производство ОАО «Компания Славич», Переславль-Залесский) лежит избирательное деструктивное воздействие на желатин коротковолнового УФ-излучения и последующее укороченное по времени травление слоя различными реагентами [1, 2]. Полученные высокие значения дифракционной эффективности (ДЭ) и низкая угловая

селективность решёток свидетельствовали о рельефном характере дифракции света на исследуемых голографических структурах. Анализ рельефа решёток проводился также методом атомно-силовой микроскопии [3], в основе которого лежит непосредственное взаимодействие зондового датчика (кантилевера) с образцом. Полученные с помощью этого метода рельефы голографических решёток представлены на рис. 1: для образцов на ПФГ-01 при использовании обращющего отбеливания (рис. 1а) и с применением прямого отбеливания с фиксированием (рис. 1б). Пространственная частота решёток равна 1200 мм^{-1} . Во избежание повреждения поверхности решёток и зонда микроскопа образцы были предварительно прогреты до $100 \text{ }^\circ\text{C}$, что укрепило структуру слоя и позволило провести успешное сканирование. Рис. 1в показывает профиль рельефа для решёток с пространственной частотой 1500 мм^{-1} на фотоматериале на основе бихромированного желатина ПФГ-04. Получено, что рельеф решёток на этом светочувствительном материале имеет более чёткую форму. Решётки получены на более высокой пространственной частоте. Глубина рельефа решёток на ПФГ-01 на пространственной частоте 1200 мм^{-1} составила более $0,2 \text{ мкм}$ и на ПФГ-04 порядка $0,5 \text{ мкм}$ для решёток частотой 1500 мм^{-1} .

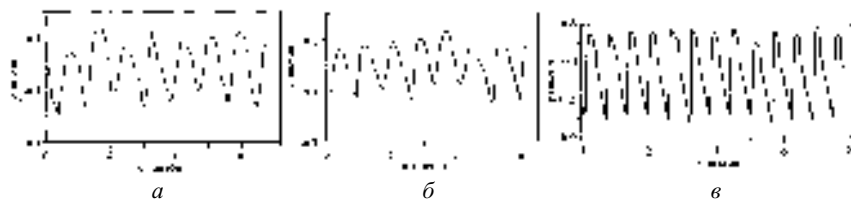


Рис. 1. Профили рельефа решёток на фотоматериалах ПФГ-01 (а и б) и ПФГ-04 (в)

Продемонстрирована работоспособность новых усовершенствованных методик получения высокочастотных голографических структур на промышленно выпускаемых фотоматериалах ПФГ-01 и ПФГ-04, что расширяет область их применения в голографии.

Список литературы:

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 21. С. 13-15.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С. Н. и др. // Оптика и спектр. 2022. Т. 130. № 9. С. 1385-1388.
3. Андреева Н.В., Габдуллин П.Г., Журкин А.М. Экспериментальные методы исследования. Методики туннельной и атомно-силовой микроскопии: учеб, пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ
МЕТОДА ДВУХЭКСПОЗИЦИОННОЙ
ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

Проведён анализ различных схем и способов записи голограмм применительно для объектов, представляющих периодическую или квазипериодическую структуру. Выделены два класса существующих схем формирования голограмм для данного типа объектов: с использованием когерентного и некогерентного света. Проанализированы преимущества и недостатки данных оптических схем при реализации метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии периодических структур. Представлены экспериментальные результаты.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

**FEATURES OF THE FORMATION OF HOLOGRAMS
OF PERIODIC STRUCTURES FOR THE IMPLEMENTATION
OF THE METHOD OF TWO-EXPOSURE HOLOGRAPHIC
INTERFEROMETRY**

The analysis of various schemes and methods of recording holograms for objects representing a periodic or quasi-periodic structure has been carried out. Two classes of existing schemes for the formation of holograms for this type of objects are distinguished: using coherent and incoherent light. The advantages and disadvantages of these optical schemes are analyzed in the implementation of the method of two-exposure holographic interferometry of periodic structures. Experimental results are presented.

Особую популярность в измерительной технике получил метод двухэкспозиционной голографической интерферометрии, заключающийся в формировании пары голограмм исследуемого объекта при различных его состояниях и восстановлении интерференционной картины [1, 2]. Данный метод получил широкое распространение при исследовании фазовых и диффузно рассеивающих объектов. Основным достоинством данного метода является компенсация аберраций низкокачественной оптики оптических систем формирования голограмм.

В отличие от оптических схем формирования голограмм фазовых и диффузно рассеивающих объектов, схемы записи голограмм периодических структур имеют существенные отличия, проявляющиеся в особенностях регулирования настройки полос голографических структур.

Проведён анализ различных схем и способов записи голограмм применительно для объектов, представляющих периодическую или квазипериодическую структуру. Существующие схемы записи голограмм периодических структур можно разделить на два класса: схемы формирования голограмм с использованием когерентного источника света и схемы, где возможно применение источника света с низкой пространственно-временной когерентностью.

Для первого класса оптических схем устройства записи голограмм близки к схемам, применяемым в классической и голографической интерферометрии фазовых объектов [3]. Для данных схем проблем с регулированием настройки полос голографических структур не возникает.

Для второго класса оптических схем характерна особенность формирования голограммы периодической структуры световыми волнами, испытавшими дифракцию непосредственной на самой структуре [4]. В этом случае положения световых волн, записывающих голограмму, зафиксированы в пространстве, что уже затрудняет произвольную регулировку голографической структуры. Для устранения данного недостатка авторами ранее было предложено в устройствах записи голограмм периодических структур в некогерентном свете дополнительно использовать опорную дифракционную решётку, с периодом и направлением полос, согласованным со структурой исследуемого объекта [5].

Представлены экспериментальные результаты опробования способов формирования голограмм периодических структур при реализации метода голографической двухэкспозиционной интерферометрии.

Список литературы

1. Бекетова А.К. и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979.
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982.
3. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // X Международная конференция по фотонике и информационной оптике : сб. науч. тр. М. : НИЯУ МИФИ, 2021. С. 463-464.
4. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 3. С. 56-60.
5. Авласевич Н.Т., Ляликов А.М. // Проблемы физики, математики и техники. 2022. № 3. С. 7-12.

В.В. МОГИЛЬНЫЙ¹, Э.А. ХРАМЦОВ^{1,2}, А.П. ШКАДАРЕВИЧ²

¹Белорусский государственный университет, Минск

²НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», Минск, Беларусь

СЕНСИБИЛИЗИРОВАННАЯ И СОБСТВЕННАЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛИМЕРА ДЛЯ ЗАПИСИ РЕЛЬЕФНЫХ ГОЛОГРАММ

Экспериментально исследована фоточувствительная композиция – полимер с боковыми антраценовыми группами – фенантренхинон – для записи рельефо-фазовых голограмм в тонких (~ 1 мкм) слоях. Показано, что устойчивые периодические рельефы с амплитудой 20 - 25 % толщины слоя на его поверхности после голографической записи и обратимой пластификации формируются благодаря фотоокислению антраценовых структур. Фоточувствительность нового материала в синей и ближней УФ-области многократно превосходит фоточувствительность подобной композиции с метиленовым синим.

U.V. MAHILNY¹, E.A. KHRAMTSOU^{1,2}, A.P. SHKADAREVICH²

¹Belarusian State University, Minsk

²STC «LEMT» of the BelOMO, Minsk, Belarus

SENSITIZED AND OWN PHOTOSENSITIVITY OF A POLYMER FOR RELIEF HOLOGRAMS' RECORDING

Photosensitive composition – polymer with side anthracene groups – phenanthrenquinone – for recording relief-phase holograms in thin (~ 1 μm) layers is experimentally studied. It is shown that stable periodic reliefs with an amplitude of 20 - 25 % of the layer thickness on its surface after holographic recording and reversible plasticization are formed due to the photooxidation of anthracene structures. The photosensitivity of the new material in the blue and near UV regions is many times greater than the photosensitivity of a similar composition with methylene blue.

В настоящей работе исследованы фотохимические превращения и образование фоторельефов после обратимой пластификации на поверхности тонких (~ 1 мкм) слоёв полимера с боковыми антраценовыми группами (А) в отсутствие и в присутствии фенантренхинона (ФХ). Последний известен как эффективный генератор синглетного кислорода и обладает значительно лучшей по сравнению с метиленовым синим совместимостью с полимерными материалами. Увеличение концентрации

фотосенсибилизатора в тонком полимерном слое с эффективным доступом атмосферного кислорода позволяло рассчитывать на ускорение фотоокисления А и создание условий для записи голографических рельефных решёток (ГРР) значительной площади.

Для А характерны две основные фотореакции – фотоокисление и фотодимеризация. Первая из них – результат взаимодействия А с синглетным кислородом, вторая развивается при поглощении света их слабыми ассоциатами без участия кислорода. Экспериментально показано, что в отсутствие ФХ при прекращении доступа кислорода покровным слоем фоточувствительность на 50% уровне конверсии А $S_{0,5} = (H_{0,5})^{-1}$, где $H_{0,5}$ – экспозиционная доза, в спектральном диапазоне 365 ÷ 408 нм (собственное поглощение А) уменьшалась в 10 - 20 раз. Это указывало на эффективную генерацию синглетного кислорода при электронном возбуждении А и многократное превышение квантового выхода фотоокисления над выходом фотодимеризации даже в отсутствие ФХ. Запись ГРР без доступа кислорода показала, что при проявлении они быстро деградируют из-за сжатия полимерной сетки, образованной сшиванием полимера при фотодимеризации.

Добавление ФХ смещает длинноволновую границу активации фотоокисления до приблизительно 535 нм. Основным каналом расходования А при свободном доступе кислорода, естественно, остается их фотоокисление. Фоточувствительность растёт с уменьшением длины волны и увеличением при этом коэффициента поглощения. Для $\lambda = 532, 465, 408, 398$ и 365 нм $S_{0,5} = 0,08, 0,68, 0,83, 1,82$ и $4,29$ см²/Дж. Экспериментально показано, что в области собственного поглощения А последние являются основным генератором синглетного кислорода при фотоокислении.



Рис. 1. Интерференционная картина в окуляре интерференционного микроскопа от поверхности ГРР, длина волны записи 532 нм, период решётки 4,5 мкм

Во всём исследованном спектральном диапазоне запись ГРР и последующая обратимая пластификация создают устойчивые периодические фоторельефы с амплитудой, достигающей 20 - 25 % толщины регистрирующего слоя (рис. 1). Фоточувствительность для сенсибилизатора метиленовый синий $S_{0,5} \approx 0,09$ см²/Дж ($\lambda \approx 650$ нм), что значительно ниже, чем для ФХ в синей и ближней УФ-областях.

Н.М. ГАНЖЕРЛИ, С.Н. ГУЛЯЕВ¹, И.А. МАУРЕР

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

НЕСТАНДАРТНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СОДЕРЖАЩИХ ЖЕЛАТИН ФОТОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

Приведены результаты экспериментов по созданию высокочастотных (1200 - 1500 мм⁻¹) рельефно-фазовых голографических решёток на светочувствительных материалах, содержащих желатин, ПФГ-04 на основе бихромата и галоидосеребряной фотоэмульсии ПФГ-01 с помощью нестандартной методики обработки. Методика включает в себя облучение светочувствительного слоя коротковолновым УФ-излучением и кратковременное травление в воде или растворах ледяной уксусной кислоты в изопропиловом спирте. Достигнуты высокие значения дифракционной эффективности образцов от 40 до 67 %.

N.M. GANZHERLI, S.N. GULYAEV¹, I.A MAURER

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

NON-STANDARD METHODS OF PROCESSING GELATIN-CONTAINING PHOTOGRAPHIC MATERIALS FOR HOLOGRAPHY

The results of experiments on the creation of high-frequency (1200 - 1500 mm⁻¹) relief-phase holographic gratings on photosensitive materials containing gelatin PFG-04 based on dichromate and silver halide photo emulsion PFG-01 using a non-standard processing technique are presented. The technique involves irradiating the photosensitive layer with short-wave UV radiation and short-term etching in water or solutions of glacial acetic acid in isopropyl alcohol. High values of diffraction efficiency of samples from 40 to 67 % have been achieved.

Использование деструктивного воздействия коротковолнового УФ-излучения [1] в сочетании с избирательным химическим дублением желатина в содержащих бихроматы отбеливающих растворах (для галоидосеребряных фотоэмульсий ПФГ-01) или с избирательным световым дублением когерентным излучением He-Cd лазера при записи первичных голограмм на слоях бихромированного желатина (БХЖ), созданных лабораторно или промышленно (ПФГ-04), позволяет получить высокоэффективные рельефные решётки на пространственных частотах 1200 - 1500 мм⁻¹. Эффективность предложенной «нестандартной»

методики обработки содержащих желатин фотоматериалов подтверждается результатами экспериментов по регистрации высокочастотных голографических решёток, приведёнными в табл. 1.

Таблица 1. Результаты экспериментов по регистрации голограмм

Наилучшие результаты получены при использовании в качестве травящего агента растворов ледяной уксусной кислоты (ЛУК) в изопропиловом спирте (ИПС) с последующим купанием слоя в ваннах из 100 % ИПС. На слоях БХЖ, изготовленных в лабораторных условиях, максимальная дифракционная эффективность (ДЭ) порядка 64 % достигнута на решётке с пространственной частотой 1500 мм^{-1} на слое толщиной 5,7 мкм. Данная технология также применена для получения высокочастотных рельефно-фазовых решёток частотой порядка 1600 мм^{-1} на промышленно выпускаемом фотоматериале ПФГ-04, при этом достигнута ДЭ рельефных решёток 67 %. Идеи разработанной для БХЖ технологии получения высокочастотных рельефно-фазовых решёток применены также для галоидосеребряного материала для голографии ПФГ-01. Получены решётки частотой 1200 мм^{-1} с ДЭ вплоть до 42 %.

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что за счёт применения “нестандартной” методики обработки происходит подавление влияния сил поверхностного натяжения на высоких пространственных частотах, что расширяет область применения фотоматериалов ПФГ-01 и ПФГ-04 в голографии [2, 3].

Список литературы

1. Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 45-49.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. № 21. С. 13-15.
3. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. и др. // Оптика и спектр. 2022. Т. 130. № 9. С. 1385-1388.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ
Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ОПТИМАЛЬНЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ В ФОТОТЕРМИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Проведено теоретическое исследование лазерного нагрева фототермических материалов для установления температурного режима записи голограмм в зависимости от теплофизических параметров материала и источника излучения. Полученные выражения позволяют рассчитать необходимую для записи информации мощность лазерного излучения в зависимости от задаваемой пространственной частоты и длительности воздействия излучения на исследуемый материал.

N.K. DZHAMANKYZOV, Y.K. ISMANOV
Institute of physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

THE OPTIMAL TEMPERATURE REGIME FOR RECORDING HOLOGRAMS ON PHOTOTHERMAL MEDIA

A theoretical study of laser heating of photothermal materials was carried out to establish the temperature regime for recording holograms depending on the thermophysical parameters of the material and the radiation source. The expressions obtained make it possible to calculate the power of laser radiation necessary for recording information, depending on the specified spatial frequency and the duration of the radiation exposure to the material under study.

Основным недостатком фототермических сред является необходимость доведения температуры облучённой области плёнки до температуры записи информации, которая близка к точке её плавления.

Как правило, оптимальный выбор теплового режима записи в фототермических средах до сих пор осуществляется экспериментально. Проведение теоретического исследования записи информации лазерным нагревом в средах позволит рассчитать значения задаваемой мощности импульса энергии для получения оптимальных режимов температуры поверхности регистрирующего слоя в зависимости от её теплофизических параметров.

Записывающая среда представляет собой некую слоистую диэлектрико-полупроводниковую структуру (ДПС), которая образуется из слоя регистрирующего соединения, заключённого между двумя

прозрачными покрытиями, одно из которых является подложкой, а другое термоизолирующей плёнкой. Пусть на такой слой регистрирующего материала падают две плоские когерентные волны под углами $\pm\theta/2$ к нормали и с длиной волны λ . Вследствие интерференции плотность падающей энергии периодически изменяется вдоль оси y . В результате поглощения света в слое наводится соответствующее температурное поле в виде некоей тепловой решётки. При достижении определённой амплитуды температурного поля происходит регистрация периодической структуры излучения посредством соответствующего изменения оптических параметров. Таким образом, под действием излучения происходит изменение свойств материала, что в общем случае зависит не только от y , но и от координаты z и времени t [1 - 3].

Основным элементом ДПС является полупроводниковый слой, который служит одновременно преобразователем входной информации и регистрирующей её средой при фототермическом способе записи. В зависимости от соотношения между толщиной полупроводникового слоя – d , глубины поглощения $1/\varepsilon$ (ε – коэффициент поглощения) и длины диффузии $L = \sqrt{at}$ (где a – температуропроводность полупроводникового слоя, t – длительность лазерного импульса) ДПС можно рассматривать как однослойную при $d > 1/\varepsilon$, $d > L$, и двухслойную при $d \leq 1/\varepsilon$, $d \leq L$. Далее, предполагая, что выполняется условие $d > 1/\varepsilon$, $d > L$, рассмотрим однослойную задачу.

Распределение источников тепловыделения в тонком полупроводниковом слое определяется характером этой интерференционной картины, сформированной двумя когерентными пучками с интенсивностями, описываемыми выражением для прямоугольного импульса

$$q(y, z) = q_0(z)[1 + m \cos(ky)], \quad (1)$$

где $q_0(z)$ – усреднённая по объёму мощность тепловыделения; $k = 2\pi/\Lambda$ – пространственная частота, Λ и m – соответственно период и глубина модуляции плотности световой энергии в полупроводниковом слое; ($\Lambda = \lambda/2 \cos\theta$ – период пространственной тепловой решётки, λ – длина волны лазерного излучения, θ – угол падения на слой светового пучка). В общем случае q_0 является функцией координат z и распределение температурного поля $T(y, z, t)$ в слое определяется решением уравнения теплопроводности с источником тепла (1)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{a}{\xi} q(y, z). \quad (2)$$

Граничные условия для (2): $\frac{\partial T(y, 0, t)}{\partial z} = 0$, $T(y, d, t) = 0$, $T(y, z, 0) = T_0$.

Здесь T_0 – температура внешней среды. Здесь a и ξ – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности материала соответственно. Решение (2) при указанных условиях найдем с учетом (1) и, когда поглощение излучения подчиняется закону Бугера–Ламберта $q_0(z) = I_0 A e^{-\alpha z}$. Решение для общей температуры поверхности регистрирующего слоя ($z = 0$) определяется соотношением

$$T(y, t) - T_0 = \Delta T(y, t) = 2 \frac{I_0 A \sqrt{at}}{\xi} [1 + M(k, t) \cos(ky)], \quad (3)$$

где коэффициент (или амплитуда) модуляции $M(k, t)$ температурного поля интерференционных полос на поверхности вдоль оси y имеет вид

$$M(k, t) = \frac{m}{2k\sqrt{at}} \Phi(k\sqrt{at}). \quad (4)$$

Здесь $\Phi(s)$ – интеграл ошибок или функция Лапласа.

Как видно из этого выражения, коэффициент модуляции зависит от пространственной частоты, от температуропроводности материала, от длительности воздействия лазерного излучения и от модуляции опорных и предметных пучков. Нет зависимости от мощности нагревающего излучения и от коэффициента теплопроводности материала [4 - 6].

Список литературы

1. Dzhamankyzov N. K., Ismanov Y.Kh., Zhumaliev K.M., Alymkulov S.A. Estimation of optimal hologram recording modes on photothermal materials // Optical Engineering. 2018. V. 57 (1). P. 017113.
2. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесчеловой радужной голограммы когерентной волной // VII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
4. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98-102.
5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33
6. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 101-103.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

АНАЛИЗ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР В НЕКОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

Исследовано влияния aberrаций оптической системы записи голограмм, содержащей дополнительную опорную дифракционную решётку, на качество формируемой голограммы периодической структуры в некогерентном свете. Установлен различный вклад aberrаций отдельных оптических элементов, входящих в оптическую схему, в результирующее искажение структуры полос голограммы.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

ANALYSIS OF ABERRATIONS OF THE OPTICAL SYSTEM FOR FORMING HOLOGRAMS OF PERIODIC STRUCTURES IN INCOHERENT LIGHT

The effect of aberrations of an optical hologram recording system containing an additional reference diffraction grating on the quality of a periodic structure hologram formed in incoherent light has been studied. A different contribution of aberrations of individual optical elements included in the optical scheme to the resulting distortion of the structure of the hologram bands is established.

При формировании голограммы исследуемого объекта для целей голографической интерферометрии aberrации оптической системы оказывают существенное влияние на качество записываемой голограммы [1]. В данной работе проведён теоретический анализ влияния aberrаций отдельных оптических компонент, входящих в систему формирования голограмм периодических структур, содержащей дополнительную опорную дифракционную решётку. Особенностью рассматриваемой оптической схемы (рис. 1) является возможность замены лазера на источник света с низкой пространственно-временной когерентностью. Преимуществом данной оптической системы формирования голограмм периодических структур является возможность регулирования величины и направления полос формируемой голографической структуры [2]. Ранее анализ aberrаций таких оптических схем не производился.

В данной работе проведён анализ этапов формирования голограммы периодической структуры с учётом влияния искажений волновых фронтов световых волн, вносимых отдельными оптическими компонентами, входящими в исследуемую оптическую систему.

Получено уравнение распределения интенсивности в плоскости формирования голограммы периодической структуры с учётом аберраций всех элементов оптики, входящих в оптическую схему исследуемого устройства [3].

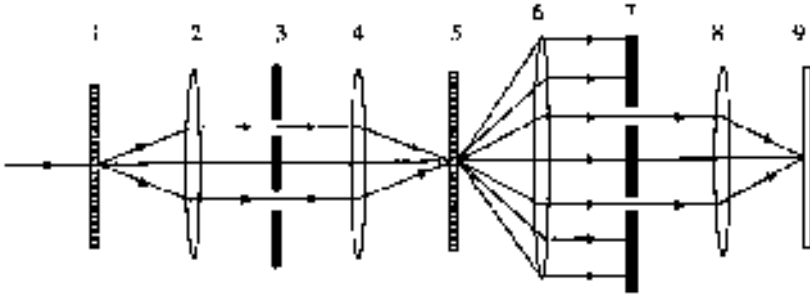


Рис. 1. Оптическая схема записи голограммы одним пучком света: 1 – опорная дифракционная решётка; 2, 4, 6, 8 – объективы; 3, 7 – экраны с отверстиями; 5 – исследуемая периодическая структура; 9 – плоскость формирования голограммы периодической структуры

Установлено, что аберрации отдельных оптических компонент вносят различный вклад в результирующие искажения полос голографической структуры голограммы. Например, установлено, что качество подложки опорной дифракционной решётки, которой дополнена классическая система перезаписи голограмм [1], не оказывает влияние на искажения голографических полос голограммы.

Список литературы

1. Ляликов А.М. Высокочувствительная голографическая интерферометрия фазовых объектов. Гродно: ГрГУ, 2010.
2. Lyalikov A.M., Avlasevich N.T. // Journal of Optical Technology. 2019. V. 86(3). P. 173-176.
3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Вестник ГрГУ им. Янки Купалы. Сер. 2. 2022. № 3. С. 81-87.

Т.З. МИНИХАНОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫМИ ГОЛОГРАММАМИ

В работе проведено численное моделирование процесса восстановления изображения бинарной страницы данных системы голографической памяти с компьютерно-синтезированных голограмм, предварительно искажённых монохроматическими абберациями, которые представляли из себя полиномы Цернике разного порядка, умноженные на весовые коэффициенты. Оценка качества восстановленных страниц данных производилась с помощью расчёта отношения сигнал/шум и определения вероятности битовой ошибки

T.Z. MINIKHANOV, E.Yu. ZLOKAZOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF OPTICAL SYSTEM ABERRATIONS ON THE PROCESS OF IMAGE FORMING BY COMPUTER-SYNTHESIZED HOLOGRAMS

In this paper we presented numerical modeling of reconstructing the data page image using computer-synthesized hologram. Holograms were pre-distorted by monochromatic aberrations. To describe the aberrations, Zernike polynomials of different orders with weight coefficients were used. The quality of the reconstructed data pages was evaluated by calculating signal-to-noise ratio and determining bit error rate.

В голографии измерение и компенсация [1] аббераций является важной задачей при построении систем формирования изображений. Абберации оказывают негативное влияние на системы архивной голографической памяти (АГП) [2] не только при записи на голографический носитель страницы данных, имеющей специальный вид для минимизации ошибок, но и при её восстановлении. Однако пока не определено, какие искажения наиболее сильно влияют на качество восстановления страниц данных. Цель работы – исследование влияния аббераций оптической системы на процесс формирования бинарной страницы данных АГП.

В результате численного моделирования восстановления искажённых абберациями, определяемыми полиномами Цернике [3], компьютерных

голограмм оценивалось отношение сигнал/шум в зависимости от весового коэффициента для каждой аберрации, который изменялся от 0.1π до 2π . График зависимости приведён на рис. 1. Используя значение отношения сигнал/шум, вычислялась вероятность битовой ошибки. Вероятность битовой ошибки больше чем 10^{-10} достигается лишь при искажении четырёх аберраций, причём для комы по обеим осям это значение достигается при наименьшем весовом коэффициенте $1,1\pi$, для дефокуса и астигматизма при 2π , а при остальных и вовсе не достигается на рассматриваемом интервале коэффициентов.

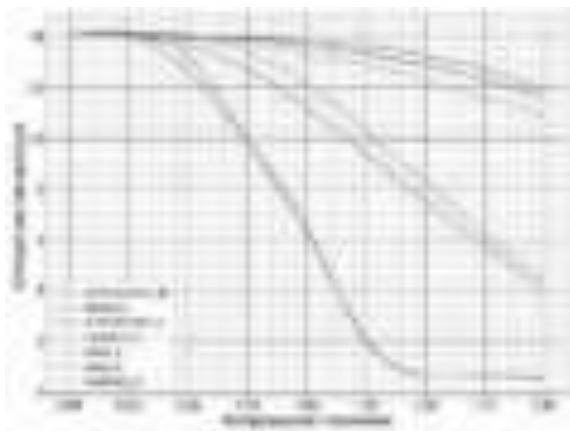


Рис. 1. Отношение сигнал/шум для всех полиномов

Исходя из полученных данных, при моделировании процесса восстановления изображений с искажёнными полиномами Цернике компьютерно-синтезированных голограмм, а также анализа вероятности битовых ошибок и отношения сигнал/шум можно сделать вывод, что наиболее сильное воздействие на восстановленное изображение бинарной страницы данных оказывает именно кома вопреки тому, что она имеет более высокий порядок, по сравнению с астигматизмом или дефокусом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Liu Y., Zhao W., Huang J. // Applied Sciences. 2018. V. 8(3). P. 444.
2. Одинокоев С.Б., Злоказов Е.Ю., Бетин А.Ю. и др. // Техносфера. 2018.
3. Lakshminarayanan V., Fleck A. // Journal of Modern Optics. 2011. V. 58 (7). P. 1678-1678.

Д.Ю. ХАРИТОНОВ, Э.Р. МУСЛИМОВ

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ-КАИ)*

ПРОГРАММНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНОЙ ГОЛОГРАММНОЙ ГРИЗМЫ

В ходе работы рассмотрены программные инструменты для моделирования композитной голограммной гризмы, записанной со вспомогательной линзой. Показано, что её использование в схеме астрономического бесщелевого спектрографа для спектрального диапазона 450 - 950 нм с относительным отверстием 1:7 позволяет повысить спектральное разрешение до 1,74 раза.

D.Yu. KHARITONOV, E.R. MUSLIMOV

The Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

SOFTWARE TOOLS FOR MODELING A COMPOSITE HOLOGRAM GRISM

In the present work, software tools for modeling of a composite hologram grism recorded with an auxiliary lens are considered. It is shown that its use in the scheme of an astronomical slitless spectrograph for the spectral range of 450 - 950 nm with a F-number of 7 makes it possible to increase the spectral resolution up to 1,74 times.

Рассматривается оптическая система бесщелевого спектрографа (рис. 1а) со следующими характеристиками: спектральный диапазон 450 - 950 нм, угловое поле зрения $35,6' \times 7,2'$, относительное отверстие 1:7, обратная линейная дисперсия 17,37 нм/мм. Спектрограф устанавливается в сходящемся пучке после телескопа CDK500 [1], представленного в модели входным зрачком 1 и параксиальной линзой 2. Диспергирующее устройство представляет собой композитную гризму из голограммной решётки 4 и призмы 5. Гризма формирует изображение спектра на плоскости 6 и формат изображения совпадает с номинальным линейным полем зрения телескопа, что позволяет использовать штатную ПЗС матрицу 3, установленную в смещённом положении. Решётка 4 является композитной, то есть разбивается на две зоны А и Б с независимо оптимизируемыми параметрами. Она имеет частоту $327,5 \text{ мм}^{-1}$ на подложке из стекла ЛК7. Решётка является объёмно-фазовой и записывается голографическим способом в схеме, показанной на рис. 1б. Параллельные пучки, формируемые точечными источниками

1, 2 и коллиматорами 3 интерферируют на подложке 5. В одном из пучков устанавливается корректор 4 с максимальной асферичностью первой поверхности 289 мкм. При записи зон А и Б изменяются время экспозиции, угол разворота корректора и профиль поверхности корректора. Применение такой решётки позволяет повысить спектральное разрешение в 1,74 раза и достичь равномерной дифракционной эффективности, повысив её значение для края спектрального диапазона с 32 до 60 %. При моделировании дифракции на голограмме используется уравнение Уэлфорда [2]. Чтобы получить трассировку лучей в схеме записи, необходимо решить систему нелинейных уравнений. Задача сводится к минимизации скалярной функции ошибок. Рассматривается симплексный алгоритм Нельдера–Мида [3], а также сочетание метода золотого сечения покоординатного спуска [4].



Рис. 1. Оптическая схема бесщелевого спектрографа: схема работы (а) и записи (б)

Создается библиотека на языке C++ (dll) в среде MS Visual Studio, которая позволяет создавать пользовательские типы поверхностей для оптических систем. Данный тип поверхности позволяет проводить трассировку луча, а также в явном виде учитывать толщину и глубину модуляции голограммы, которая используется при расчёте её дифракционной эффективности по формулам Когельника [5] при помощи программы макроса.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-79-00082.

Список литературы

1. CDK500 Observatory Systemт – <https://planewave.com/product/cdk500-telescope-system/>.
2. Welford W. A. // Optics communications. 1975. V. 14. P. 322-323.
3. Lagarias J.C., et al. // SIAM J. of Optimization. 1998. V. 9(1). P. 112-147.
4. Гребенникова И.В. Методы оптимизации: учебное пособие. Екатеринбург.: УрФУ, 2017.
5. Kogelnik H. // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P. 2909-2947.

Т.Д. ТЫНЫШОВА, Ю.Х. ИСМАНОВ¹*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек, Кыргызская Республика*¹*Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек***ЭФФЕКТ ТАЛЬБОТА ДЛЯ ОДНОМЕРНОЙ РЕШЁТКИ
В ПРИСУТСТВИИ ТОНКОЙ ЛИНЗЫ**

Рассмотрено влияние фазовой неоднородности типа тонкая линза на распределение плоскостей саморепродукций одномерной дифракционной решётки. Показано, что плоскости сгущаются перед фокусом и расходятся за ним, и масштаб саморепродукций уменьшается перед фокусом линзы и возрастает за ним.

T.D. TYNYSHOVA, Y.K. ISMANOV¹*Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyz Republic*¹*Institute of physics, NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek***THE TALBOT EFFECT FOR A ONE-DIMENSIONAL GRATING
IN THE PRESENCE OF A THIN LENS**

The effect of phase inhomogeneity of the thin lens type on the distribution of self-reproduction planes of a one-dimensional diffraction grating is considered. It is shown that the planes of self-reproductions thicken in front of the focus and diverge behind it. The scale of self-reproductions decreases in front of the focus of the lens and increases behind it.

В качестве фазового объекта рассмотрим тонкую линзу (рис. 1), фазовое преобразование которой имеет вид $\phi_L = k[n\ell - (x_1^2 + y_1^2)/2f]$, где ℓ – толщина линзы по её оси, f – фокусное расстояние, n – показатель преломления материала линзы. Записав коэффициент пропускания

решётки как $t(x_0) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp(j2\pi x_0 n/d)$ (d – период решётки,

m – дифракционный порядок), получаем сразу за линзой поле

$$U_L(x, y, z) = \frac{\exp(jkz)}{2j\lambda z} \int_{-a}^a \int_{-a}^a \sum_{m=-M}^M c_m \exp(j \frac{2\pi x_1 m}{d}) \exp\{jk[n^i - (x_1^2 + y_1^2)/2f]\} \times \\ \times \exp\{j \frac{\pi}{\lambda z} [(x - x_1) + (y - y_1)^2]\} dx_1 dy_1.$$

расчёт которого даёт соотношение, определяющее положения плоскостей саморепродукции

$$U_L(x,y,z) = \frac{f}{4(f-z)} \exp(jkz) \exp(jkn') \exp[-j\frac{\pi}{\lambda}(x^2 + y^2)] \{F[\sqrt{\frac{\pi}{z'\lambda}} \times \\ \times (a - \frac{d}{d'}y)] - F[\sqrt{\frac{\pi}{z'\lambda}} (-a - \frac{d}{d'}y)]\} \sum_{m=-M}^M c_m \exp[2\pi j(\frac{m}{d'}x - \frac{m^2\lambda}{2d^2}z')] \times \\ \times \{F[\sqrt{\frac{\pi}{z'\lambda}} (a - \frac{d}{d'}x + \frac{mz'\lambda}{d})] - F[\sqrt{\frac{\pi}{z'\lambda}} (-a - \frac{d}{d'}x + \frac{mz'\lambda}{d})]\}.$$

Здесь $F(x) = \int_0^x \exp(j\pi t^2/2) dt$ – интеграл Френеля, $z' = fz/(f-z)$, $d' = d(f-z)/f$.

Полагая, $z'\lambda/(2d^2) = N$, получаем для плоскостей саморепродукции [4 - 6].

$$\frac{1}{z_N} = \frac{1}{2d^2N} + \frac{1}{f}$$



Рис. 1. Эффект Тальбота в присутствии фазового объекта:
G – одномерная решётка, O – фазовый объект, Э – экран

Список литературы

1. Maripov A., Ismanov Y. Interferometer based on the Talbot effect in holography // J. Optics (Paris). 1995. V. 26. No. 1. P. 25-28.
2. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесчеловой радужной голограммы когерентной волной // VII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
4. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98-102.
5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33
6. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3 (57). С. 171-178.

А.П. ЛАВРОВ, С.И. ИВАНОВ, З.А. ЗАБАЛУЕВА
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СПЕКЛЫ ПРИ ДИФРАКЦИИ ВОЛНЫ НА ТРАНСПАРАНТЕ С МАССИВОМ СЛУЧАЙНО РАСПОЛОЖЕННЫХ МАЛЫХ ОТВЕРСТИЙ

Рассмотрена дифракция плоской волны на транспаранте, содержащем массив случайно расположенных отверстий с радиусом, меньшим длины волны. Исследованы характеристики спекл-структуры в дифрагированной волне. В основе расчёта дифракции лежит разложение по плоским волнам. Расчёты проводятся численными методами в специализированном пакете GLAD.

A.P. LAVROV, S.I. IVANOV, Z.A. ZABALUEVA
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

SPECKLES IN A DIFFRACTED WAVE FOR AN ARRAY OF SMALL HOLES RANDOMLY LOCATED IN A TRANSPARENCY

The diffraction of a plane wave on a transparency containing an array of randomly located holes with a radius smaller than the wavelength is considered. The characteristics of the speckle structure in a diffracted wave are investigated. The diffraction calculation is based on plane-wave decomposition. Calculations are carried out by numerical methods in the specialized software GLAD.

В работе рассчитываются характеристики электромагнитной волны с комплексной амплитудой $\dot{E}(x,y) = 1$ после её дифракции на массиве N отверстий в транспаранте с функция пропускания $\dot{i}(x,y) = \sum_n g_0(x-x_n, y-y_n) \exp(j\varphi_n)$, где x_n , y_n , φ_n – случайные координаты центров отверстий и их фаз, а g_0 – «супергаусс» (как приближение к «обычной» функции пропускания круглого отверстия) с радиусом r_0 : $g_0(x,y) = \exp[-((x^2+y^2)/r_0^2)^m]$, $m = 4$. Величины x_n , y_n , φ_n распределены равномерно в заданных пределах $\pm x_c$, $\pm y_c$, $\pm \varphi_c$. Дифрагированное поле $\dot{E}_D(x,y)$ рассматривается в дальней зоне – на расстоянии z от транспаранта. Из-за случайности в $\dot{i}(x,y)$ поле $\dot{E}_D(x,y)$ даёт сложную пространственную структуру интенсивности $I_D(x,y)$ – это спеклы [1]. Расчёт характеристик выполняется численными методами в специализированном пакете GLAD [2]. Расчёт $\dot{E}_D(x,y)$ – без приближения малых углов дифракции, на основе концепции плоских волн. Особенность нашей задачи: $r_0 < \lambda$.

В работе исследуются многие характеристики спеклов, среди них: контраст C , двумерная автокорреляционная функция (АКФ), пространственная огибающая, а также их изменения при изменении N , g_0 , z , реализации случайности и др. Ниже приведены некоторые результаты расчётов для такой системы: $\lambda = 0,63$ мкм, $g_0 = 0,15$ мкм, размеры транспаранта $2x_c = 2y_c = 20$ мкм, $2\varphi_c = 270^\circ$, $z = 3$ см, $N = 49$.

Рис. 1 показывает x - и y -сечения спеклов в области $4,75 \times 4,75$ см². Контраст спеклов [1] $C = 103$ %. На рис. 2 приведено x -сечение АКФ для $I_D(x,y)$. Ширина АКФ по уровню 0,5 по осям x и y равна 858 и 937 мкм, это оценка для размера спеклов. Рис. 3 показывает фрагмент спекловой структуры в двух кольцевых зонах с радиусами R 1,1 и 1,7 см. Усреднённая по многим реализациям пространственная огибающая спеклов $\bar{I}_D(x,y)$ однозначно связана с диаметром отверстий $2g_0$.

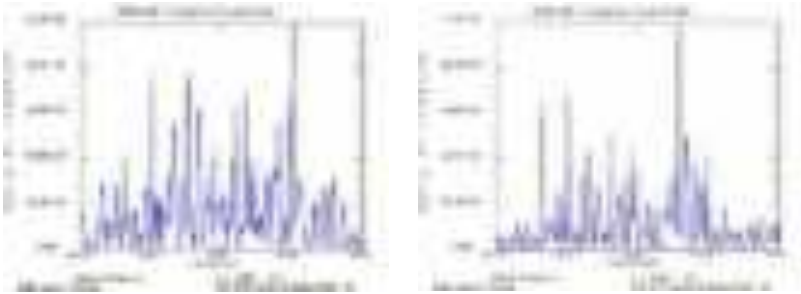


Рис. 1. Сечения спеклов по координатам: X – слева, Y – справа

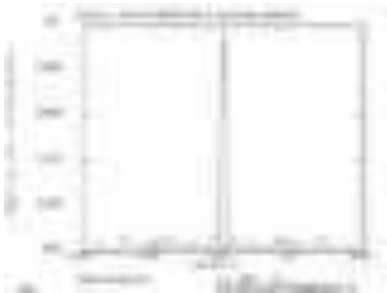


Рис. 2. Автокорреляционная функция спеклов – сечение по X

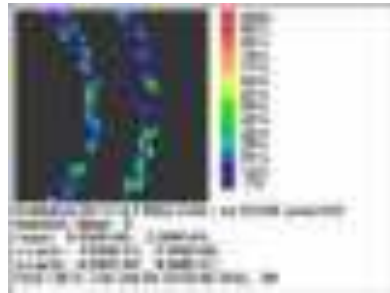


Рис. 3. Фрагмент спекловой структуры в двух кольцевых зонах

Список литературы

1. Франсон М. Оптика спеклов. М: Мир, 1980.
2. General Laser Analysis and Design, <https://aor.com>.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, С.А. АЛЫМКУЛОВ
Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ НЕКОГЕРЕНТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Проведён анализ особенностей формирования оптической передаточной функции системы, в которой используется некогерентный свет. Показано, что главной особенностью таких оптических систем является то, что в случае некогерентного освещения предмета оптическую систему следует рассматривать как линейное преобразование интенсивности света.

Y.K. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV, S.A. ALYMKULOV
Institute of physics, NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

TRANSFER FUNCTION OF AN INCOHERENT OPTICAL SYSTEM

An analysis of the features of the formation of the optical transfer function of a system in which incoherent light is used is carried out. It is shown that the main feature of such optical systems is that in the case of incoherent illumination of an object, the optical system should be considered as a linear transformation of the light intensity.

Рассмотрим процесс формирования изображения с помощью оптической системы при освещении объекта некогерентным монохроматическим светом (рис. 1).

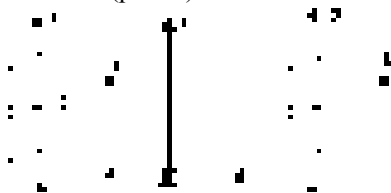


Рис. 1. Схема размещения плоскостей объекта, изображения и линзы в оптической системе, d_0 и d_i – расстояния от плоскости объекта до линзы и от линзы до плоскости изображения соответственно; L – линза

В случае некогерентного освещения предмета оптическую систему следует рассматривать как линейное преобразование интенсивности света. Для оптических систем, в которых используется некогерентное освещение, интенсивность определяется свёрткой [1 - 3].

$$I_i(x_i, y_i) = \kappa \iint_{\infty} |h(x_i - x_0, y_i - y_0)|^2 I_g(x_0, y_0) dx_0 dy_0, \quad (1)$$

где I_g – интенсивность идеального изображения в приближении геометрической оптики; h – импульсный отклик системы; k – действительная постоянная; I_i – интенсивность изображения в рассматриваемой точке.

Отсюда при частотном анализе таких систем следует считать, что они осуществляют линейное преобразование распределения интенсивности. Исходя из этого, вводятся нормированные частотные спектры распределений I_g и I_i , которые определяются выражениями [4 - 6]:

$$G_g(f_x, f_y) = \frac{\iint_{\infty} I_g(x_0, y_0) \exp[-i2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] dx_0 dy_0}{\iint_{\infty} I_g(x_0, y_0) dx_0 dy_0}, \quad (2)$$

$$G_i(f_x, f_y) = \frac{\iint_{\infty} I_i(x_i, y_i) \exp[-i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] dx_i dy_i}{\iint_{\infty} I_i(x_i, y_i) dx_i dy_i}, \quad (3)$$

где f_x, f_y – координаты в частотной области. Нормированную передаточную функцию системы можно определить таким же образом:

$$G(f_x, f_y) = \frac{\iint_{\infty} |h(x_i, y_i)|^2 \exp[-i2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] dx_i dy_i}{\iint_{\infty} |h(x_i, y_i)|^2 dx_i dy_i}. \quad (4)$$

Список литературы

1. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 101-103.
2. Исманов Ю.Х., Джаманкызов Н.К., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Восстановление бесшелевой радужной голограммы когерентной волной // VII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2018. С. 596-597.
3. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д. Уменьшение объема вводимых данных при компьютерной обработке интерферограмм // VIII Межд. конф. по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 695-696.
4. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Абдулаев А.А. Моделирование оптической системы, работающей при некогерентном освещении // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 3. С. 98-102.
5. Исманов Ю.Х. Восстановление изображения волнами различной длины // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 4. С. 30-33
6. Исманов Ю.Х., Тынышова Т.Д., Алымкулов С.А. Использование приближения Френеля для расчета распределения светового поля, прошедшего сквозь решетку // Вестник КГУСТА. 2017. № 3 (57). С. 171-178.

А.В. БЕЛАШОВ, А.А. ЖИХОРЕВА, Е.В. БЕГЛОВА,
Т.Н. БЕЛЯЕВА¹, А.В. САЛОВА¹, И.К. ЛИТВИНОВ¹,
Е.С. КОРНИЛОВА¹, И.В. СЕМЕНОВА, О.С. ВАСЮТИНСКИЙ
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
¹*Институт цитологии РАН, Санкт-Петербург*

КАЛИБРОВКА И ОПТИМИЗАЦИЯ НИЗКОКОГЕРЕНТНОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

В работе представлено описание метода калибровки и оптимизации техники низкокогерентной цифровой голографической микроскопии с использованием пространственно-временного модулятора света. В ходе анализа зависимости качества восстановления фазовых распределений живых и фиксированных клеток определены основные оптимальные параметры кольцевой диафрагмы конденсора для реализации метода фазово-контрастной микроскопии. Продемонстрировано существенное повышение качества фазовых изображений при спектральной фильтрации излучения освещения образца.

A.A. ZHIKHOREVA, A.V. BELASHOV, E.V. BEGLOVA,
T.N. BELYAEVA¹, A.V. SALOVA¹, I.K. LITVINOV¹,
E.S. KORNILOVA¹, I.V. SEMONOVA, O.S. VASYUTINSKII
Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹*Institute of Cytology of the RAS, Saint-Petersburg*

CALIBRATION AND OPTIMIZATION OF LOW-COHERENT HOLOGRAPHIC MICROSCOPY USING LCOS-SLM

We present a method for calibrating and optimizing the technique of low-coherence digital holographic microscopy using a space-time light modulator. When analyzing the reconstruction quality of live and fixed cell images the best parameters of the annular condenser diaphragm were determined for the implementation of phase-contrast microscopy. A significant increase in the quality of phase images with spectral filtering of sample illumination has been demonstrated.

В последние годы цифровая голографическая микроскопия и томография всё чаще привлекают внимание исследователей в области цитологии и микробиологии. Высокая степень неинвазивности методов количественного фазового имиджинга, а также возможность получения

количественных данных о морфологических и физиологических характеристиках объектов позволяют использовать эти подходы для исследования широкого класса биологических процессов. Применение лазерных источников излучения для наблюдения интерференционных картин, однако, влечёт формирование когерентного шума, уменьшающего точность получаемой информации. Предложенный недавно метод низкокогерентной цифровой голографической микроскопии с использованием пространственно-временного модулятора света, основанный на фазово-контрастной микроскопии [1] с другой стороны позволяет получить более качественные фазовые изображения клеток без негативного влияния когерентного шума.

В ходе выполнения данной работы нами был произведён поиск оптимальных условий для реализации указанного метода количественного фазового имиджинга. Была проведена вариация параметров кольцевой диафрагмы конденсора, в частности её радиуса и ширины, а также проведена оценка точности восстановления фазовых распределений живых и фиксированных клеток при разных параметрах установки. Для количественной оценки точности восстановления фазовых изображений они сопоставлялись с эталонным распределением фазового набега, полученным с помощью метода голографической томографии. Кроме того, нами исследовалось качество восстановления фазовых изображений клеток при разном спектральном составе излучения, изменяемом с помощью интерференционных фильтров и светофильтров с разными характеристиками. Было установлено, что при работе на микрообъективе 40x с числовой апертурой 1.15 наилучшее качество восстановления достигается при использовании кольцевой диафрагмы радиусом 8 мм и шириной 1 мм, что соответствует диапазону числовых апертур освещения от 0.26 до 0.29. Наилучшие значения точности восстановления фазы были достигнуты при использовании наиболее узкого из опробованных светофильтров с центральной длиной волны 520 нм и шириной полосы в 28 нм. Также в ходе выполнения работы нами был предложен алгоритм калибровки экспериментальной установки и корректного определения положения и размера фазового кольца, генерируемого с помощью пространственно-временного модулятора света.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-72-10044.

Список литературы

1. Wang Z., et al. Spatial light interference microscopy (SLIM) // Optics Express. 2011. V. 19. No. 2. P. 1016-1026.

А.С. ДЮБОВ, М.С. КУЗЬМИН, С.А. РОГОВ

*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРА С ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ ДЛЯ ВВОДА СИГНАЛОВ

Приводятся результаты измерения динамического диапазона оптического спектроанализатора с жидкокристаллической матрицей на входе. Верхняя граница динамического диапазона определяется по уровню ложных сигналов на выходе анализатора при подаче на его вход нескольких гармонических сигналов. Получен динамический диапазон 43 дБ для трёхчастотного входного сигнала.

A.S. DIUBOV, M.S. KUZMIN, S.A. ROGOV

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE DYNAMIC RANGE OF AN OPTICAL SPECTRUM ANALYZER WITH A LIQUID-CRYSTAL MATRIX FOR SIGNAL INPUT

The results of measuring the dynamic range of an optical spectrum analyzer with a liquid-crystal input matrix are presented. The upper limit of the dynamic range is determined by the level of false signals at the output of the analyzer when several harmonic signals are applied to its input. A dynamic range of 43 dB was obtained for a three-frequency input signal.

Динамический диапазон (ДД) оптических анализаторов спектра ограничивается, в основном, нелинейностью характеристики пространственного модулятора света (ПМС), приводящей, при больших входных сигналах, к появлению на выходе спектроанализатора ложных максимумов комбинационных частот.

Величины ложных сигналов можно найти теоретически, из разложения характеристики ПМС в степенной ряд. Поскольку вклад нелинейных членов высшего порядка в этом разложении как правило уменьшается, обычно рассматривают влияние нелинейных членов только второго и третьего порядка. Если выбрать рабочий диапазон спектроанализатора размером в одну октаву, когда $f_{\max} = 2f_{\min}$, то комбинационные частоты второго порядка, равные сумме и разности частот входных сигналов, не

попадают в этот диапазон. В этом случае достаточно учесть влияние комбинационных частот только третьего порядка типа $2f_2 - f_1$ или $f_2 + f_3 - f_1$, которые могут попасть в рабочий диапазон устройства.

При экспериментальном исследовании ДД обычно на вход спектроанализатора подают гармонические сигналы двух или трёх частот одинаковой амплитуды, меняя её уровень от нижней границы ДД, когда сигналы спектра основных частот только появляются из-под шума на выходе, до верхней границы ДД, когда из-под шума появляются сигналы комбинационных частот. Пользуясь такой методикой, мы получили ДД спектроанализатора с растровым вводом сигналов [1] в 43 дБ. Ввод сигналов в оптическую систему осуществлялся с помощью жидкокристаллической матрицы от видеопроектора. Уровень шума и спектральных компонент на выходе измерялся с помощью веб-камеры. Вид выходных сигналов устройства для трёхсигнального входного сигнала показан на рис. 1. Уровень сигналов на входе в данном случае превышал верхнюю границу ДД, чтобы хорошо были видны ложные сигналы наибольшей амплитуды.

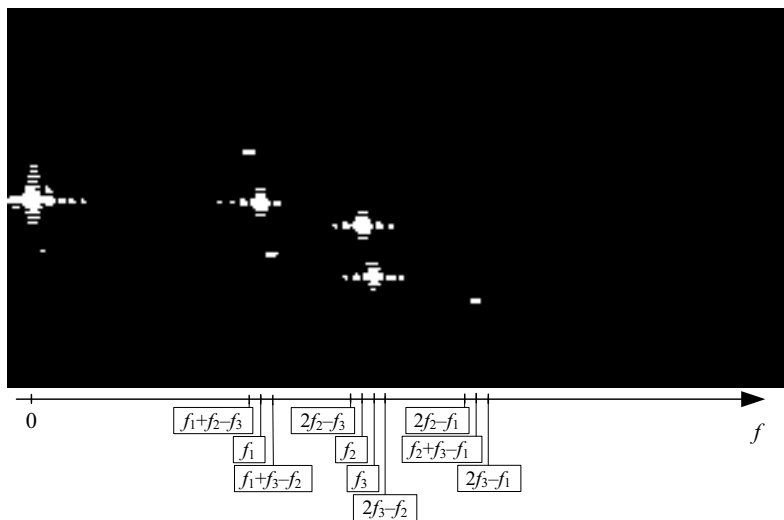


Рис. 1. Выходные сигналы спектроанализатора при трёх сигналах на входе

Список литературы

1. Кузьмин М.С., Рогов С.А. Анализатор свернутого спектра с жидкокристаллическим устройством ввода сигналов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 15. С. 1-5.

В.В. КРАСНОВ, Д.А. РЫМОВ, А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОПТИЧЕСКОГО КОДИРОВАНИЯ ВИДЕОПОТОКОВ
В СХЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДВУХ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА**

Для оптического кодирования видеопотоков информации в режиме реального времени рассмотрено применение пространственно-временных модуляторов света. Про моделирован макет системы кодирования с учётом характеристик модуляторов света и цифровых камер новейших типов.

V.V. KRASNOV, D.A. RYMOV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**MODELING OF VIDEO OPTICAL ENCRYPTION
IN A SCHEME USING TWO SPATIAL LIGHT MODULATORS**

For optical encryption of video in real time, the use of spatial light modulators is considered. The encryption system is modeled taking into account the characteristics of the latest types of the modulators and digital cameras.

С развитием вычислительных мощностей компьютерной техники и развитием квантовых вычислений, возрастают требования к защищённости информации [1, 2]. При этом современные объёмы передачи данных требуют адекватного быстродействия кодирующей аппаратуры. Большую часть передаваемых данных составляют видеопотоки (в том числе видеосвязь), которые зачастую также требуют адекватного шифрования. Применение пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) позволяет осуществлять смену кодирующих ключей в режиме реального времени [3], то есть обеспечивать кодирование каждого кадра видеопоследовательности своим индивидуальным ключом.

Проведено исследование возможностей применения в исследуемых системах ПВМС новейших типов. Схема макета моделируемой системы кодирования видеопотока представлена на рис. 1а. В качестве ПВМС для отображения видеопоследовательности кодирующих фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) – HoloEye PLUTO-2.1-VIS-016, а регистрирующей камеры – КМОП Flare 48MP. Создана программа,

осуществляющая моделирование процесса кодирования и последующее декодирование. В программе осуществлён учёт шумов фотосенсора, шумов синтеза ДОЭ, оптические aberrации и фоновая засветка, формируемая рассеянным нулевым порядком дифракции и отражениями от оптических поверхностей. Величина фоновой засветки задавалась как величина пропорциональная нормированной средней энергии (НСЭ) ключей кодирования. В качестве критерия качества использовалась величина нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО). Была получена зависимость НСКО декодированных кадров от плотности ключей кодирования, представленная на рис. 1б. В качестве погрешностей отложена величина среднеквадратического отклонения, полученная по 15 кадрам видеоряда для каждого значения НСЭ.

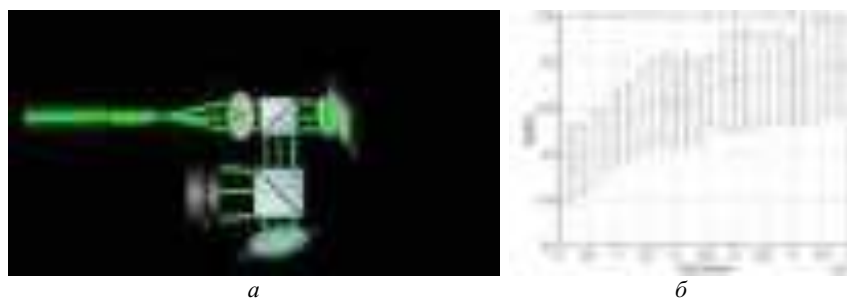


Рис. 1. Схема макета системы оптического кодирования видеопотока (а) и график зависимости качества декодированных кадров видеоряда от НСЭ ключа (б)

Из полученной зависимости видно, что приемлемый уровень искажений (порядка 0,2) достигается при значениях НСЭ ключей кодирования не более 0,005. Также определено, что при значениях отношения сигнал/шум 5 и выше, визуальное качество декодированного видеоряда находится на достаточно высоком уровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-00117.

Список литературы

1. Nishchal N.K. Optical Cryptosystems. IOP Publishing, 2019.
2. Javidi B., Carnicer A., Yamaguchi M., et al. Roadmap on optical security // Journal of Optics. 2016. V. 18. P. 083001.
3. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Lensless optical encryption with speckle-noise suppression and QR codes // Applied Optics. 2021. V. 60 (24). P. 7336-7345.

Н.В. НИКИТИН, А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
Н.Н. ЕВТИХИЕВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ШУМОВ ЦИФРОВЫХ КАМЕР НА КАЧЕСТВО РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ПТИХОГРАФИИ

Фурье-птихография является бесконтактным и не интерференционным методом реконструкции изображений, позволяющим работать даже в широкоугольном режиме съёмки. На качество восстановления изображений существенно влияют шумы цифровой камеры. В работе проведена численная оценка покомпонентного влияния шумов на качество реконструкции.

N.V. NIKITIN, A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN,
N.N. EVTIKHIEV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EFFECT OF DIGITAL CAMERAS NOISE ON RECONSTRUCTION QUALITY IN PTYCHOGRAPHY

Fourier ptychography is non-contact and non-interference method for image reconstruction. This method can work in large field of view mode. Reconstructed image quality is highly depending on noises of digital cameras. Effect of each noise component was numerically estimated in this work.

Фурье-птихография позволяет восстанавливать изображения объектов с хорошим разрешением без потери угла обзора [1]. Однако данный метод имеет свои ограничения: например, большое время регистрации и снижение качества из-за большого количества темновых снимков. Уменьшение времени экспозиции может привести к снижению отношения сигнал/шум, поэтому необходимо оценить влияние каждой составляющей шума регистрирующих цифровых камер в отдельности, в том числе для их возможной компенсации совместно или при возможности по отдельности.

Существует четыре основных вида шумов цифровых камер, которые возникают при регистрации изображений: световой и темновой пространственные шумы, световой и темновой временные шумы [2]. Темновой временной шум связан со случайными темновыми процессами, возникающими в пикселях. Фотонный дробовой шум – основная причина светового временного шума. Темновой и световой пространственные

шумы характеризуются неоднородностью восприятия сигнала каждого пикселя и характеризуются параметрами DSNU (dark signal non-uniformity) и PRNU (photo response non-uniformity) соответственно.

В работе проведено исследование покомпонентного влияния шумов на качество реконструкции для различных значений среднего сигнала по всем зарегистрированным изображениям. Для реконструкции изображения использовался итеративный алгоритм для птихографии на основе алгоритма Герчберга–Сэкстона. Параметр перекрытия составлял 58 %; в качестве фотодетектора была смоделирована матрица цифровой камеры PixelLink PL-B781F с соответствующими данной матрице шумовыми характеристиками: PRNU = 0,0075, DSNU = 0,66 цифр. ед., темновой временной шум равен 0,35 цифр. ед. [2]. В качестве объекта использовались изображения размером 1024×1024 пикселей. На рис. 1 представлен график зависимости качества восстановленного изображения по метрике нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) относительно оригинала от величины экспозиции.

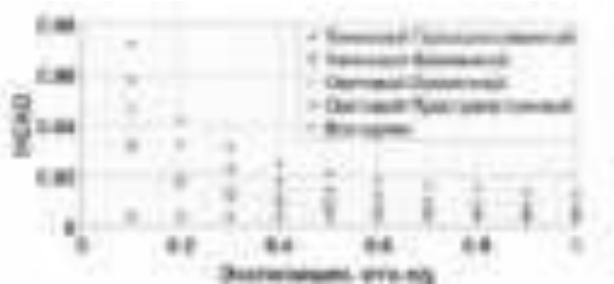


Рис. 1. График зависимости качества реконструкции по метрике НСКО от величины экспозиций

Видно, что основной вклад в данном случае вносят световой временной и темновой пространственный шум. Их влияние можно уменьшить путём автоматической компенсации. Полученные результаты можно использовать для определения неустранимых ограничений, возникающих при реконструкции изображений в фурье-птихографии.

Список литературы

1. Konda P.C., Loetgering L., Zhou K.C., Xu S., Harvey A.R., Horstmeyer R. Fourier ptychography: current applications and future promises // Optics Express. 2020. V. 28. P. 9603-9630.
3. Евтихийев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В. и др. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. 2021. V. 45 (2). P. 267-276.

Т.Ш. ФАЗЛИЕВ, Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ДИФРАКЦИОННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ – ОБЗОР

В обзоре приведены новейшие результаты по имплементации дифракционные нейронных сетей. Обсуждаются возможные реализации линейных и нелинейных слоёв нейронной сети в оптике, а также основные преимущества и недостатки по сравнению с их электронными аналогами.

T.Sh. FAZLIEV, R.S. STARIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DIFFRACTIVE NEURAL NETWORKS – SURVEY

This paper presents the newest results of implementation of diffractive neural networks. Realizations of linear and nonlinear layers of neural network in optics, as well as main advantages and disadvantages compared to their electronic analogies have been discussed.

Современные методы обработки информации, основанные на применении нейронных сетей глубокого обучения предъявляют всё более высокие требования к производительности вычислительных устройств. Оптика позволяет перенести большую часть основных операций и преобразований, применяющихся в нейронных архитектурах, на оптоэлектронные устройства, тем самым улучшить энергетические характеристики вычислительных систем и повысить их быстродействие [1]. Это обусловлено фундаментальным параллелизмом оптических систем, а также энергоэффективностью, быстродействием и возможностями интеграции современных и перспективных оптоэлектронных устройств. Например, современные средства высокоскоростной модуляции света способны работать на частотах переключения кадров в десятки кГц при разрешении выше Мпикс. Указанные возможности оптики обусловили новую волну интереса к исследованиям в области оптического нейрокомпьютинга и, в частности, к дифракционным нейронным сетям, новейшим реализациям которых посвящён данный краткий обзор.

В [2] демонстрируется возможность построения полносвязной оптической многослойной нейронной сети при помощи пассивных дифракционных слоёв. В [3] имплементированы оптические свёрточные

слои за счёт использования пространственно-временных модуляторов света в 4f-схеме (рис. 1). Помимо реализации нейросетевых слоёв в оптике, авторы [4] предлагают использовать ячейку с парами атомов рубидия-85 в качестве устройства, реализующего нелинейную функцию активации, что позволит создать полностью оптическую многослойную сеть.

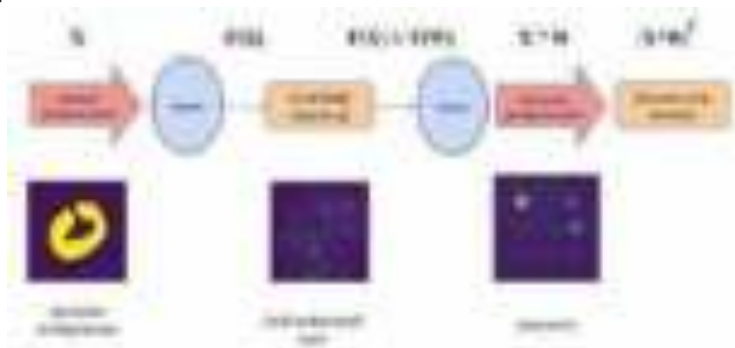


Рис. 1. Диаграмма работы дифракционной сети, основанной на 4f-схеме

В [5] демонстрируется возможность создания дифракционного вычислительного блока, на основе которого можно создать более сложные архитектуры нейронных сетей. Интересным решением является совместное использование оптической и электронной частей, что позволяет добиться баланса между быстродействием системы распознавания и её точностью. В [6] предложена подобная гибридная система, в которой первые свёрточные слои реализуются в оптике, а оставшаяся часть вычислений выполняется электроникой, что даёт выигрыш в быстродействии системы при сохранении точности распознавания. Таким образом, различные архитектуры дифракционных нейронных сетей в настоящее время могут быть реализованы на основе доступных оптоэлектронных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Cornelia D. Optical neural networks. Springer Science & Business Media, 2013.
2. Lin X., et al. // Science. 2018. V. 361. No. 6406. P. 1004-1008.
3. Chang J., et al. // Scientific reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 1-10.
4. Zuo Y., et al. // Optica. 2019. V. 6. No. 9. P. 1132-1137.
5. Zhou T., et al. // Nature Photonics. 2021. V. 15. No. 5. P. 367-373.
6. Colburn S., et al. // Applied Optics. 2019. V. 58 (12). P. 3179-3186.

С.А. КИРИЙ, Д.А. РЫМОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ 2D-СЦЕН С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕРАТИВНО-СОСТЯЗАТЕЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТИ

Для восстановления изображений с голограмм 2D-сцен реализован и предложен метод на основе генеративно-сопоставительной нейросети, включающей в себя сеть-генератор, который производит восстановление изображений с голограмм, и сеть-дискриминатор, оценивающий качество полученного изображения. Проведена численная оценка качества восстановленных изображений.

S.A. KIRIY, D.A. RYMOV, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

2D SCENE HOLOGRAM RECONSTRUCTION VIA GENERATIVE ADVERSARIAL NEURAL NETWORK

A generative-adversarial neural network model, consisting of a generator network, which generates images, and a discriminator network, which assesses their quality was trained to reconstruct images from in-line holograms. Images reconstructed via the trained network are presented.

Применение нейронных сетей в голографии является перспективной сферой, так как, например, такой подход может позволить избежать появления нежелательных порядков дифракции при восстановлении изображений [1] в силу обучения модели на исходных изображениях объектов, что позволяет выделить из голограммы только информацию об исходном объекте без использования дополнительной фильтрации [2].

В работе проведено исследование возможности восстановления изображений с голограмм с применением генеративно-сопоставительной нейросети [3], состоящей из сети-генератора с архитектурой U-Net [4] и сети-дискриминатора (рис. 1а). Генеративно-сопоставительный метод представляет из себя использование одновременно двух нейронных сетей, одна из которых производит восстановление изображений с голограмм (сеть-генератор), а вторая оценивает качество полученных результатов (сеть-дискриминатор). Таким образом происходит взаимообучение двух нейросетей, что может способствовать более подробному обучению

сети-генератора и, как следствие, более высокому качеству восстановленных изображений. Голограммы для обучения данной модели синтезируются на основе изображений из базы изображений рукописных цифр MNIST размерами 128×128 пикселей. На рис. 1б и 1в представлены примеры оригинальных изображений и восстановленных при помощи обученной модели соответственно.

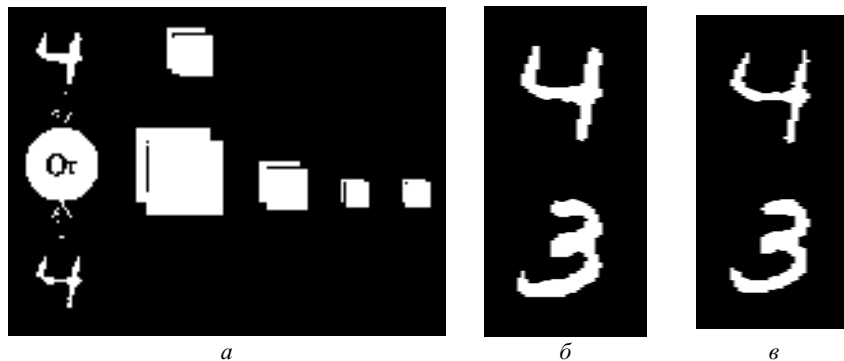


Рис. 1. Схема сети-дискриминатора (а), примеры оригинальных изображений (б) и восстановленных с применением генеративно-сопоставительной нейросети (в)

Видно, что полученные изображения визуально схожи с исходными данными. Метрики оценки качества также подтверждают высокий уровень работоспособности модели: среднее значение коэффициента корреляции для 100 восстановленных изображений составляет 0,97, а индекса структурного сходства – 0,91.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Schnars U., Falldorf C., Watson J., Jüptner W. Digital holography and wavefront sensing principles, techniques and applications. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
2. Рымов Д.А., Черёмхин П.А., Стариков Р.С. Нейросетевая реконструкция сцен с цифровых голограмм на основе извлечения амплитуды и фазы // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 11-19.
3. Khan A., Zhijiang Z., Yu Y., Khan M.A., Yan K., Aziz K. GAN-Holo: Generative adversarial networks-based generated holography using deep learning // Hindawi Complexity. 2021. V. 2021. P. 6662161.
4. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for biomedical image segmentation // MICCAI. 2015. V. 9351. P. 234-241.

А.С. СВИСТУНОВ, Д.А. РЫМОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
Р.С. СТАРИКОВ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

НЕЙРОСЕТЕВАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФАЗОВЫХ ОБЪЕКТОВ С ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

Для повышения качества реконструкции изображений с осевых голограмм фазовых объектов предложен нейросетевой метод. Получено повышение качества восстановленных изображений как с синтезированных, так и цифровых голограмм сцен, состоящих из двух объектных плоскостей.

A.S. SVISTUNOV, D.A. RYMOV, P.A. CHEREMKHIN,
R.S. STARIKOV

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

NEURAL NETWORK RECONSTRUCTION OF PHASE OBJECT IMAGES FROM DIGITAL HOLOGRAMS

A neural network reconstruction method was proposed to improve the quality of phase object reconstruction from in-line holograms. An increase in quality of reconstructed images from both computer-generated and digital holograms of two object planes was achieved.

Машинное обучение активно применяется для решения различных задач, в том числе и для голографии [1]. Оно может позволить восстанавливать изображения без неинформативных порядков дифракции и с более высоким отношением сигнал/шум, чем стандартные методы реконструкции [2, 3]. В работе предложен вариант нейросети для восстановления изображений нескольких объектных плоскостей с голограммы Френеля. Апробация данной модели проводилась на компьютерно-синтезированных и оптически записанных голограммах. Для численных экспериментов был создан набор данных из 30000 изображений размером 1024×1024 пикселя. В качестве объектов в плоскостях были выбраны рукописные цифры из набора данных MNIST.

Для оценки качества восстановленного изображения использовался индекс структурного сходства (ИСС). Получено, что на выборке из 100 восстановленных тестовых изображений с синтезированных голограмм для ближней объектной плоскости ИСС равнялся $0,86 \pm 0,04$, а для дальней плоскости – $0,85 \pm 0,04$. Таким образом, для синтезированных

голограмм модель продемонстрировала хорошие результаты по метрике ИСС.

Модель нейросети также была обучена и применена для реконструкции изображений с экспериментально зарегистрированных голограмм. Для этого была собрана установка, в которой на два фазовых пространственно-временных модулятора света выводили изображения объектов – цифр. Таким образом, был записан набор данных из 4944 цифровых голограмм размером 2048×2048 пикселей. Пример восстановленных изображений с помощью обученной модели нейросети представлен на рис. 1а и 1б. Оригиналы объектов даны на рис. 1в и 1г. Для ближней объектной плоскости (рис. 1а) ИСС составлял $0,84 \pm 0,04$, а для дальней (рис. 1б) – $0,85 \pm 0,03$.



Рис. 1. Изображения, восстановленные нейросетью с цифровой голограммы (а, б), и оригинальные изображения (в, г)

Таким образом, данный метод восстановления даёт хорошие результаты по качеству восстановленных изображений как на синтезированных, так и оптически записанных голограммах. Это может быть полезно для реконструкции голограмм типовых объектов, таких как, например, частицы в диспергированной среде для их локализации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Chermkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Machine learning methods for digital holography and diffractive optics // *Procedia Computer Science*. 2020. V. 169. P. 440-444.
2. Li R., Pedrini G., Huang Z., Reichelt S., Cao L. Physics-enhanced neural network for phase retrieval from two diffraction patterns // *Optics Express*. 2022. V. 30 (18). P. 32680.
3. Yang Y., Lian Q., Zhang X., Zhang D., Zhang H. HIONet: Deep priors based deep unfolded network for phase retrieval // *Digit. Signal Process.* 2022. V. 132. P. 103797.

А.В. КОЗЛОВ, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОЦЕНКА ЛОКАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПО ШУМАМ ЦИФРОВОЙ КАМЕРЫ ДЛЯ ВИНЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Одним из ограничений в цифровой голографии являются шумы. В работе предлагается использовать информацию о шумах регистрирующей цифровой камеры для расчёта локального отклонения в фильтре Винера. Спекл-контраст на экспериментально зарегистрированных голограммах Френеля снижен на $3 \div 9$ %.

A.V. KOZLOV, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

LOCAL VARIANCES ESTIMATION FROM DIGITAL CAMERA NOISE FOR WIENER FILTER IN DIGITAL HOLOGRAPHY

Noise is one of limiting factors in digital holography. In this paper digital camera noise is used to evaluate local variances for Wiener filter. Speckle noise in registered Fresnel digital holograms is reduced to $3 - 9$ % with the proposed algorithm.

В настоящее время цифровая голография активно применяется во многих областях. Шумы являются одним из основных ограничений. Применение цифровых фильтров относится к числу наиболее часто используемых подходов шумоподавления [1]. Задача подбора параметров фильтра, характеризующих шум, остаётся актуальной. В работе предлагается использовать шумы цифровой камеры, на которую производилась регистрация для расчёта параметра, характеризующего отклонения для фильтра Винера [1]. Для расчёта оценки суммарного шума камеры использовалась модель, предложенная в стандарте EMVA 1288 [2].

Для апробации метода измерены шумовые параметры камер. В качестве примера рассмотрены шумы камеры Retiga R6 [3] как входной параметр фильтра Винера. Для этого в каждом пикселе восстановленного изображения рассчитано среднеквадратическое отклонение (СКО) шума, после чего все шумы суммировались и делились на общее число пикселей. При подстановке отклонений, кратных $2 \div 3$ СКО, увеличивается качество обрабатываемого изображения. Сдвиг эффективного СКО в сторону больших значений в основном обусловлен наличием спекл-шума.

Восстановленное изображение с голограммы, зарегистрированной камерой Retiga R6, в исходном виде и после фильтра приведены на рис. 1. Для более наглядной демонстрации снижения шума в левом нижнем углу представлена увеличенная зона. Значения спекл-контраста (СК) [1] приведены в табл. 1. Номера зон, в которых определялся СК, указанные в таблице, соответствуют номерам выделенных зон на рис. 1а.

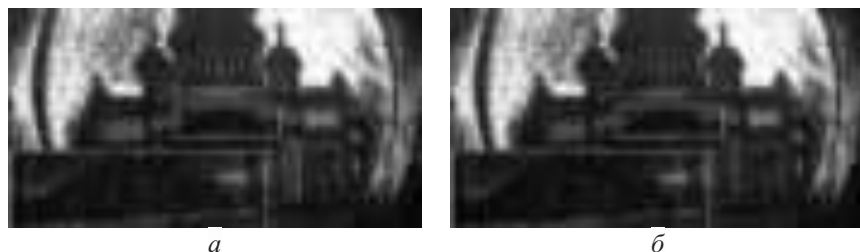


Рис. 1. Восстановленное изображение (а), результат винеровской фильтрации со значением отклонения, рассчитанного на основе двух СКО шумов Retiga R6 (б)

Таблица 1. Значения спекл-контраста

Номер рассматриваемой зоны	Спекл-контраст			
	1	2	3	4
Исходное изображение	0,55	0,55	0,59	0,62
Изображение после фильтра	0,53	0,52	0,54	0,59

Видно, что зашумлённые равномерные области стали более гладкими, при этом сохранена детализация. Снижение СК составляет от 3 до 9%. Поскольку в общем случае подбор параметров фильтрации представляет перебор значений рассматриваемых величин в определённых пределах, использование информации о шумах камеры для расчёта одного из параметров – эффективный вариант для практических приложений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-29-00603.

Список литературы

1. Bianco V, Memmolo P, et al. // Science & Applications. 2018. V. 7 (1). P. 48.
2. European Machine Vision Association. EMVA Standard 1288 Release 4.0. 2021.
3. Евтихийев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В. и др. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. 2021. V. 45 (2). P. 267-276.

Е.А. САВЧЕНКОВА, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АНАЛИЗ ГИСТОГРАММЫ СЖАТЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ КВАНТОВАНИЯ

Сжатие файлов голограмм можно осуществить путём квантования. В работе рассмотрены возможности улучшения методов сжатия голограмм на основе анализа гистограмм интенсивности.

E.A. SAVCHENKOVA, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

ANALYSIS OF HISTOGRAM OF DIGITAL HOLOGRAMS COMPRESSED BY VARIOUS QUANTIZATION METHODS

Holograms can be compressed by quantization. The paper considers the possibilities of improving the methods of hologram compression by analysis of intensity histograms.

Для хранения голографического видео и/или большого числа цифровых голограмм, для их быстрой передачи, обработки и оптического восстановления требуется производить сжатие информации [1]. К числу распространённых способов сжатия изображений (и голограмм) относится квантование. Скалярные методы квантования основаны на независимой одновременной обработке каждого пикселя голограммы [2]. За счёт одновременности достигается высокая скорость сжатия. Векторные методы квантования основаны на анализе групп пикселей, объединённых в вектора [2]. Такой подход к обработке голограмм позволяет учесть не только значения яркости отдельных конкретных пикселей, но также учесть взаимосвязь между ними, за счёт чего повышается качество восстановления изображений со сжатых голограмм. Однако при этом существенно снижается скорость обработки голограмм.

Для возможности улучшения методов сжатия голограмм в работе был проведён анализ гистограмм интенсивности квантованных голограмм. Пример гистограммы интенсивности экспериментально зарегистрированной цифровой голограммы показан на рис. 1. Также представлены гистограммы голограмм, сжатых векторным методом квантования динамических ядер (рис. 1а) и скалярными методами

Ллойда–Макса (рис. 1б) и равномерного квантования по уровню (рис. 1в) в случае снижения разрядности файла до 2 бит (4 градаций).



Рис. 1. Гистограммы интенсивности оригинальной цифровой голограммы и сжатой методами динамических ядер (а), Ллойда–Макса (б) и равномерного квантования по уровню (в) при снижении разрядности до 2 бит

Как видно, для более сложного скалярного метода квантования (Ллойда–Макса) гистограмма значительно точнее совпадает с гистограммой исходной голограммы; качество восстановления изображений повышается до 10 % (по значениям метрики пикового отношения сигнал/шум) по сравнению с равномерным квантованием по уровню. Векторный метод квантования обеспечил ещё большее совпадение профилей гистограмм исходной и квантованной голограмм. Качество восстановления повышено до 12 %.

Таким образом, более высокое качество сжатых цифровых голограмм достигается при использовании методов квантования, обеспечивающих большую схожесть профиля гистограмм с оригинальной голограммой. Внесение дополнительных шагов, обеспечивающих более точный учёт краевых значений гистограммы (например, компандирование), должно позволить повысить качество сжатия.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 22-79-10340.

Список литературы

1. Schelkens P., Ahar A., Gilles A., et al. Compression strategies for digital holograms in biomedical and multimedia applications // *Light: Advanced Manufacturing*. 2022. V. 3. P. 40.
2. 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.

А.С. ОВЧИННИКОВ, В.В. КРАСНОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН,
В.Г. РОДИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ БИНАРИЗАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ОСЕВЫХ ГОЛОГРАММ ФРЕНЕЛЯ В РАСХОДЯЩИХСЯ ПУЧКАХ

Приведены результаты исследования методов бинаризации амплитудных голограмм Френеля в расходящихся пучках. По результатам численных и оптических экспериментов определены методы, обеспечивающие наилучшее качество реконструкции изображения.

A.S. OVCHINNIKOV, V.V. KRASNOV, P.A. CHEREMUKHIN,
V.G. RODIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

INVESTIGATION OF METHODS OF AMPLITUDE INLINE FRESNEL HOLOGRAMS IN DIVERGENT BEAMS

The results of the analysis of methods of binarization of amplitude Fresnel holograms in diverging beams are presented. Based on the results of numerical and optical experiments, the methods providing the best quality of image reconstruction were determined.

Высокоскоростная реконструкция голографических и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) может быть реализована с помощью микрозеркальных модуляторов (МЗМ) света [1]. Так как МЗМ отображают только бинарные изображения, то синтезируемые ДОЭ должны быть бинарными. В работе проведено исследование возможности улучшения метода синтеза амплитудных бинарных осевых голограмм Френеля, восстанавливаемых в расходящихся пучках.

Метод состоит из трёх этапов [2]. На первом этапе используется модифицированный итерационный алгоритм Герчберга–Сэкстона. Второй и третий этапы – бинаризация по методу Отсу и прямой поиск с использованием метода случайной траектории (ППСТ) соответственно. Три этапа имеют разное время расчёта: первые два этапа длятся несколько десятков секунд, в то время как третий этап длится значительно дольше. Поэтому при практическом применении возникает необходимость

сократить время синтеза голограммы. Выбор оптимального метода бинаризации может сократить время третьего этапа синтеза голограмм.

Проведены численные эксперименты по синтезу амплитудных бинарных голограмм Френеля для реконструкции в расходящихся пучках. В качестве тестовых объектов использовались полутоновые изображения размером 256×256 пикселей. Примеры даны на рис. 1а, 1в и 1д. Синтезированные голограммы показаны на рис. 1б, 1г и 1е. Далее к полученной полутоновой голограмме применялись методы бинаризации, а также оценивалось качество реконструкции на основе индекса структурного сходства (ИСС) и дифракционной эффективности (ДЭ). Значение параметра ИСС для метода Саувола равно 0,23, что на 21 % лучше, чем обеспечивает метод Отсу.

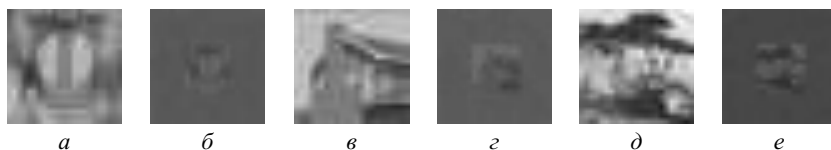


Рис. 1. Исходные изображения (а, в, д) и соответствующие им синтезированные голограммы (б, г, е)

Бинаризованные голограммы были выведены на МЗМ и оптически реконструированы. Среднее улучшение изображений после бинаризации голограммы методом Саувола составляет 62 % (SSIM) по сравнению с методом Отсу. После ППСТ метод Саувола обеспечивает лучшие результаты по ИСС на 61 %. По сравнению с бинаризацией по Отсу, используемой в оригинальном методе синтеза, дифракционная эффективность повышена на 27 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 21-79-00117.

Список литературы

1. Компанец И.Н., Андреев А.Л. Микродисплей в системах пространственной модуляции света // Квантовая электроника. 2017. Т. 47 (4). С. 294-302.
2. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov R.S., Zlokazov E.Yu. Iterative synthesis of binary inline Fresnel holograms for high-quality reconstruction in divergent beams with DMD // Optics and Lasers in Engineering. 2022. V. 150. P. 106859.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Абрамов А.С. 274
Абрамочкин Е.Г. 188
Абросимов И.Н. 572
Авакянц Л.П. 100
Авдеев П.Ю. 308, 316
Аверин С.В. 212
Авершин А.А. 570
Авласевич Н.Т. 614, 623
Аврамчиков М.О. 390
Агушто М. 394
Аймуханов А.К. 276
Айт А.О. 280
Акимова Я.Е. 534
Акмалов А.Э. 438
Александров А.И. 117
Александров А.С. 558
Алексеенко Н.А. 352, 354, 366, 368
Алеферкина К.Е. 161
Алимкина И.С. 328
Алонова М.В. 218
Алсаиф Я. 388
Алымкулов С.А. 633
Аманова М.А. 610
Амброзович С.А. 242, 278
Андреева О.Б. 320
Андреева О.В. 374, 378, 388
Андрейчиков К.С. 344
Аникьев А.А. 396, 402, 406, 424
Аникьева Э.Н. 402, 406, 424
Антошин А.А. 112
Апушкинский Е.Г. 340
Арсенин А.В. 30, 78, 129
Архипов А.В. 612
Асадчиков В.Е. 346, 348
Асеев В.А. 133
Асташкевич С.А. 324, 326
Аунг Ч.Н. 566
Афанасьева О.Л. 600
Афиногенова Е.Ю. 578
Ахматханов А.Р. 58
Ахметова О.А. 342

-Б-

Бабкин О.Э. 450
Бабкина А.Н. 294
Бабкина Л.А. 450
Базавлук Е.С. 590
Баранов К.Н. 250
Барбашов В.А. 36
Баринова О.П. 290
Барышников Н.В. 424
Батталова Э.И. 102
Бахус А.В. 516, 518, 530
Беглова Е.В. 635
Безбородова Е.С. 494
Безвиконный Н.В. 316
Безруков П.А. 238
Безус Е.А. 40, 54
Белашов А.В. 592, 596, 635
Белоусова А.С. 212
Белый В.Н. 38
Бельская Д.Е. 58
Бельтюков Я.М. 596
Беляева Т.Н. 592, 635
Бердыбаева Ш.Т. 386
Би Д. 106
Бикбаев Р.Г. 143
Биленко И.А. 108
Бирюков А.М. 340
Благова Е.В. 548
Бланк В.А. 40
Блоцкая Д.С. 412
Бобе А.С. 498
Бобрева Л.А. 408
Богачков И.В. 454, 460, 464, 466, 468,
470, 496, 508
Богданов А.А. 542
Бойченко А.П. 240, 248
Болотов Д.В. 492, 512
Болтанский М.В. 516, 518
Большев Е.А. 510
Бородин Ю.П. 42
Бородина Л.Н. 119, 123
Брагин И.О. 208
Брецько М.В. 534
Бугай А.Н. 540

Будаговский И.А. 356
Булгаков В.А. 556
Булгаков Е.Н. 137, 155
Булыга Д.В. 254, 268, 272, 484
Бурдин А.В. 452
Буримов Н.И. 58
Бурков А.С. 151
Бурмистров Е.Р. 100
Бурцев А.А. 125
Буряков А.М. 302, 308, 316
Бусурин В.И. 566
Бутов О.В. 34
Бухаров Д.Н. 274
Быков Д.А. 40, 54
Быков Е.П. 488
Бычкова С.А. 64
Бяков А.В. 542

-В-

Валова Т.М. 280
Ванин А.И. 432
Варжель А.С. 448
Варжель С.В. 165, 175, 448, 476, 480,
486
Вартанян Т.А. 82
Васильев О.С. 121
Васильев Р.Б. 278
Васильева А.В. 350
Василюк Г.Т. 280, 282
Васютинский О.С. 592, 635
Вдовенко А.Н. 564
Векшин М.М. 474, 504
Вениаминов А.В. 119
Венидиктова О.В. 280
Винаров А.З. 382
Вишневы А.А. 147, 286
Владимиров А.П. 222
Вовченко Е.Д. 344
Вознесенская А.О. 498
Войцеховский А.В. 304
Волков В.Г. 580, 584
Волков В.С. 30, 78, 129
Волков П.А. 394
Володина Н.О. 364
Волошин В.В. 163
Волошина А.Л. 175, 472, 476, 486
Волчков С.С. 32
Волынкин В.М. 272
Волынский М.А. 224

Вольхин И.Л. 462
Воляр А.В. 534
Воробьев И.Л. 163
Воронцова И.О. 520
Воропай Е.С. 366, 368
Восканян Г.Р. 86
Вохник О.М. 194

-Г-

Гаврилова Д.А. 264, 268, 272
Гаврилова М.А. 264
Гаврушко В.В. 442
Газизов А.Р. 318
Галуцкий В.В. 60
Ганжерли Н.М. 612, 618
Ганчевская С.В. 40
Гапоненко Н.В. 135
Гапоненко Р.В. 80
Гарбузов К.Н. 52
Гарипова М.А. 462
Гаркушин А.А. 462
Гарматина А.А. 346, 348
Гатауллина Ю.Р. 430
Гаугель А.О. 228
Гейнц И.Ю. 149
Гейнц Т.А. 149
Гейнц Ю.Э. 202, 266, 284
Георгиева А.О. 200
Герасимов В.С. 155
Герасимов И.А. 344
Гехт М.Э. 242, 278
Гийе Ж.-П. 192
Гилев Д.Г. 171
Гиндин П.Д. 580, 584
Гладских И.А. 82
Глебович Т.С. 280
Гоголева С.Д. 282
Голант К.М. 482
Головастикова Н.В. 40
Голубев А.В. 564
Гомонов Д.Н. 522
Гончаров Р.К. 510, 520
Гончаров Ф.М. 206
Горбатова А.В. 302, 308, 316
Гордиенко В.М. 346, 348
Горенский Ф.А. 110
Горн Д.И. 304
Горяев М.А. 234
Гресис В.О. 594

Гресько В.Р. 127
Гречин С.Г. 410
Григорьев К.С. 145
Гриценко А.В. 86
Гроссфельд Э.В. 117
Грудинин Д.В. 129
Губин М.Ю. 30, 78
Гуляев С.Н. 612, 618
Гуляшко А.С. 372
Гурылева А.В. 594
Гурьев Д.А. 390
Гущин С.В. 262

-Д-

Давыдовская В.В. 414
Дададжанов Д.Р. 82
Дайбаге Д.С. 242, 278
Данилин А.Н. 108, 179
Данилов В.А. 538
Дашинский А.А. 322
Дворецкий С.А. 304
Демидов В.В. 452, 484
Денисов Д.Г. 50, 552
Дергачев А.А. 190
Джабр Я. 582
Джаманкызов Н.К. 620, 633
Джунг А.Д. 478
Дзядух С.М. 304
Диаз Ф. 394
Диденко Я.С. 394
Дирко В.В. 288
Дмитриев А.А. 165, 175, 448, 486
Дмитриев В.К. 570
Добдин С.Ю. 198
Долгирев В.О. 604, 608
Долгополов А.Д. 127
Долгополов И.С. 578
Донченко В.А. 88
Дормидонов А.Е. 153
Досколович Л.Л. 40, 54
Драмлян Р. 115
Драчев В.П. 28, 52
Дубиков А.В. 58
Дубкова М.А. 362
Дубынин С.Е. 42
Дунаева Е.Э. 392
Дусов Й. 236
Дымшиц Ю.М. 346, 348
Дьячкова И.Г. 346, 348

Дю В.Г. 416
Дюбов А.С. 637

-Е-

Евстропьев С.К. 254, 264, 268, 272,
484, 488
Евтихийев Н.Н. 641
Егоров А.Н. 364
Егоров В.И. 514
Егоров Ю.А. 534
Егорова К.А. 110
Егорова О.Н. 458
Езерский А.С. 200
Елисеев Н.Н. 125
Елисеев С.П. 86
Елифанов Е.О. 94
Еремеев К. 394
Еремин А.В. 542
Ермолаев Г.А. 30
Ерохин К.Ю. 512
Ершов А.Е. 155
Ефремецев В.Г. 590
Ефремецев Н.Г. 590

-Ж-

Жақанова А.М. 276
Жигарьков В.С. 90, 117
Жигунов Д.М. 52
Жихорева А.А. 592, 596, 635
Журавлев С.Г. 458

-З-

Забалуева З.А. 631
Завгородний Д.С. 550
Забогин А.П. 352, 354, 358, 360, 366,
368
Зайцев А.И. 458
Зайцев В.Д. 157
Заклдаев Р.А. 374, 378, 388
Залозная Е.Д. 153
Захарчук И.А. 242, 278
Землянов А.А. 202, 342
Землянов А.А. 88
Земцов Д.С. 52
Земцова А.К. 52
Зенкевич А.В. 364
Зенкина А.А. 212
Зимина Ю.И. 394
Зимняков Д.А. 32, 218

Злоказов Е.Ю. 600, 625
Зо Л.Х. 566
Золотовский И.О. 446
Золотухина А.А. 594
Зотов А.М. 186
Зуева П.В. 462
Зырянова К.С. 294

-И-

Ибрагимов Р.З. 506
Ибрагимова Э.И. 588
Иванков Н.А. 510
Иванов А.А. 98
Иванов А.М. 420
Иванов Г.Ю. 167
Иванов П.А. 226
Иванов С.А. 123, 602
Иванов С.И. 631
Иванова Н.А. 44
Иванова Т.В. 550
Ивахненко А.О. 534
Игнатъев А.И. 133, 292
Избасарова Э.А. 300
Измайлова Н.В. 244
Ильина В.В. 450
Ильюшина Д.А. 612
Инкин М.Г. 198
Ионин А.А. 392
Ионин В.В. 125
Исаев В.А. 163
Исмаил А. 104
Исмайлова А.С. 478
Исманов Ю.Х. 620, 629, 633
Ишемгулов А.Т. 246

-К-

Кабанова О.С. 48, 210, 428
Кабашин А.В. 30
Кадетова А.В. 398
Кадриев О.Р. 442
Казак Н.С. 38
Казанцев И.С. 30
Казанцев С.Ю. 370, 458, 492, 512
Казанцева А.В. 84
Казиева Т.В. 530
Калязина Д.В. 165, 448
Ками П. 394
Кандидов В.П. 145, 153
Капитанова О.О. 30

Каплунов И.А. 420
Карамышева С.П. 250
Карасик В.Е. 50
Каргин Ю.Ф. 416
Карева А.К. 350
Карпач П.В. 280, 282
Карпов В.В. 580, 584
Карпов М.А. 106
Карпов О.Н. 121
Кафеева Д.А. 82, 374
Кашапов А.И. 54
Кесаев В.В. 374
Киняевский И.О. 96, 392
Кирий С.А. 645
Киртаев Р.В. 78
Киселев А.В. 125
Киселев Ф.Д. 520
Кистенева М.Г. 416
Климачев Ю.М. 96
Клишина В.А. 165, 480
Клюев Д.С. 44
Князьян Н.Б. 254
Ковалев В.И. 392
Коваленко М.Н. 352, 354, 366, 368
Кожевников В.А. 338, 340
Козлов А.В. 641, 649
Козлов А.Ю. 96
Козлова А.И. 175, 472, 476, 486
Козлова Е.С. 536
Козлова Н.Н. 64
Козловский К.И. 438
Колдаев В.В. 346, 348
Колесников О.В. 492, 512
Колобкова Е.В. 270
Колосовский А.О. 163
Командир Б. 276
Комаров О.А. 492
Комисаров В.А. 175, 476, 486
Комяк К.Г. 48
Кондратенко В.С. 66
Кондратьев Н.М. 179
Конеев Р.В. 320
Конин Ю.А. 456
Коннов Д.А. 472
Коннов К.А. 472
Конради Д.С. 444
Копёнкин С.С. 42
Корец Д.А. 322
Корибут А.В. 392

Корнилова Е.С. 592, 635
Коробков К.А. 566
Короленко П.В. 186, 194
Коршунов А.А. 346, 348
Косарева О.Г. 145
Косолапова К.Д. 72
Косолобов С.С. 52
Кострицкий С.М. 500
Костромькина В.В. 384, 436
Костюк Г.К. 598
Костюков А.С. 155
Котковский Г.Е. 438
Котликов Е.Н. 576
Котов В.М. 212
Котова С.П. 36
Кох К.А. 422
Коханенко А.П. 288
Кочуев Д.А. 30
Краснов В.В. 639, 653
Кретушев А.В. 558
Криштоп В.В. 171, 462
Кроль И.М. 290
Кручинин Н.Ю. 314
Кубанов Р.Т. 186
Кудрявцев А.А. 324, 326
Кудрявцев А.В. 560
Кудрявцева А.Д. 106
Кузищин Ю.А. 438
Кузнецов А.С. 66
Кузнецов В.В. 572
Кузнецов И.В. 62
Кузнецов Н.Ю. 145
Кузнецов П.И. 173
Кузнецов С.А. 434
Кузнецов С.А. 580, 584
Кузнецов С.В. 262
Кузнецов С.Н. 512, 526
Кузьменко Н.К. 270
Кузьмин Д.С. 526
Кузьмин М.С. 526
Кузьмин М.С. 637
Кукенов О.И. 288
Кулак Г.В. 412
Куликова В.А. 165, 448, 472, 480
Кулиш О.А. 504
Кульпина Е.В. 256, 258, 260, 294
Кундикова Н.Д. 430
Кунева М. 400
Курочкин Н.С. 86

Кучеренко М.Г. 310, 314

-Л-

Лавров А.П. 631
Лавровская Н.П. 576
Лазаренко П.И. 356
Лантух Ю.Д. 70
Лалин В.А. 446
Ларионов И.А. 167, 372
Ларионов С.А. 438
Ласткин В.А. 442
Лебедева Е.Д. 308, 316
Лебедева Я.С. 356
Левковская В.М. 306
Лексин А.Ю. 30
Лелекова А.Ф. 274
Летова Е.Ю. 550
Летута С.Н. 246
Ли Ч. 374
Липатов Д.С. 34
Липатьев А.С. 123
Лис Д.А. 394
Литвинов И.К. 635
Литвинов М.Ю. 488
Лифиренко В.А. 240
Лобанов В.Е. 108
Логунов Л.С. 270
Лозовой К.А. 288
Лойко П.А. 394
Лотин А.А. 125
Луканина В.М. 214
Лукьянов Б.С. 282
Лунёв А.Ю. 296, 298
Луценко А.С. 456
Любутин П.С. 542
Ляликов А.М. 614, 623
Ляпин А.А. 262

-М-

Маврицкий О.Б. 364
Майдыковский А.И. 312
Макаева Р.Х. 548
Макаревич А.В. 606
Макаров В.А. 145, 159
Макаров С.В. 270
Макин В.С. 92
Макин Р.С. 92
Маковецкая Т.А. 169
Максимов Д.Н. 143, 155

Максимов Е.М. 438
Максимов Л.В. 64
Малец М.А. 330, 332
Мальшев О.К. 135
Мамонов Е.А. 312
Мандур М.М. 326
Марасанов Д.В. 256, 258, 260
Мардини А.А. 76
Маркеев А.М. 30
Маркова Л.В. 352, 354
Мартынов И.Л. 135, 438
Маскевич А.А. 280
Маскевич С.А. 280, 282
Матеос Х. 394
Матросова А.С. 452
Матюшкина А.А. 252
Маурер И.А. 612, 618
Махманов У.К. 236
Махсудов Б.И. 46
Мачихин А.С. 594
Мелехов А.П. 344
Мельников А.Н. 546
Мельникова Е.А. 48, 210, 428
Меньшиков Р.В. 304
Мешковский И.К. 488
Микерин С.Л. 422
Миленкович Т. 74
Минаев Н.В. 94, 112, 117, 346, 348,
372, 382
Минаев С.Е. 372
Минаева Е.Д. 112, 372
Минаева С.А. 382
Минаков Ф.А. 64
Минибаев А.И. 139
Минина О.В. 202, 342
Миниханов Т.З. 600, 625
Миньков К.Н. 179, 426
Миронов Л.Ю. 256, 258, 260
Миронов М.С. 129
Миронова Т.В. 106
Мирущенко М.Д. 72
Михайлов Н.Н. 304
Михалевский В.А. 125
Михарев Е.А. 296, 298
Мишина Е.Д. 302
Могильный В.В. 616
Можаева М.Д. 346, 348
Молчанов С.В. 420
Моне П. 192

Моор Я.Д. 476
Морозихин А.Н. 590
Мосенцов С.Н. 185
Москвин М.К. 56
Мохов В.И. 194
Муравьев И.А. 410, 544
Муратов Д.А. 131
Мурашкина Т.И. 490
Мурзина Т.В. 312
Мусабекова Э.К. 276
Мусихина Е.С. 602
Муслимов Э.Р. 627
Муссауи А. 268, 484
Мусурмонов К.Н. 236
Мухин Ю.В. 430
Мушин Ф.Ю. 310
Мясников Д.В. 151

-Н-

Навныко В.Н. 412, 414, 606, 610
Надолинский А.М. 320
Насараиа А.П. 526
Наседкин Б.А. 206
Нассер Х. 133
Нащекин А.В. 238
Небавский В.А. 204
Невзоров А.А. 125
Неелова А.Д. 376
Нестеров Н.А. 598
Никитин Н.В. 641
Никитин Н.С. 372
Николаев Н.А. 64, 422, 434
Николаев Н.Э. 131, 390
Николаева И.А. 145
Николаева И.Н. 440
Никоноров Н.В. 123, 133, 270, 292
Нифонтова Е.В. 462
Ничипорко С.Ф. 418
Новиков В.Б. 312
Новиков С.М. 78
Носова Е.И. 376

-О-

Образцова Е.Д. 104
Обронов И.В. 151
Овчаренко С.В. 316
Овчаров А.В. 90
Овчинников А.С. 653
Ожогин И.В. 282

Ольхова А.А. 362
Орехов И.О. 104
Орехова Н.А. 358, 360
Орлова А.О. 250, 252
Осадченко А.В. 242, 278
Осипов Е.В. 438
Осколкова Т.О. 252
Остапив А.Ю. 167
Охрименко А.А. 558

-П-

Павлов А.В. 228
Павлов И.Н. 216
Павлов Н.Н. 186, 568, 588
Павлов П.В. 222
Палатников М.Н. 398, 404, 408
Панин К.С. 284, 542
Панин С.В. 542
Панина Е.К. 266, 284
Панов Н.А. 145
Пантелеева Е.П. 210, 428
Парфенов В.А. 115, 121, 350, 376, 582
Паршикова Т.В. 490
Патапович М.П. 330, 332, 334
Патрикеева А.А. 362
Патрикеева А.А. 50
Певцов Д.Н. 242
Певцов Н.В. 242
Первушин Б.Е. 206
Перин А.С. 62
Пермякова И.Е. 98
Перро Ж.-Б. 192
Песняков В.В. 292
Петрашко Л.Р. 90
Петров А.А. 598
Петров В.М. 502
Петров Н.В. 192, 200
Петров Н.И. 532, 538
Петухов И.В. 400
Пикуль О.Ю. 562
Пискунова Е.Р. 66
Пиякина А.А. 290
Плеханов А.А. 438
Плотникова Е.Ю. 490
Плясцов С.А. 488
Подлипное В.В. 40
Пождаев Е.П. 36
Полетаев Д.А. 336
Пономарев Р.С. 400

Полов А.А. 30
Полов В.В. 538
Полов П.А. 394
Полов С.М. 34, 163
Привалов В.Е. 338
Пройдакова В.Ю. 262
Проколова Д.В. 188
Прокофьев Е.В. 56
Пронин А.А. 524
Проскурин С.Г. 220
Прохоренков Н.О. 224
Прохоров А.В. 30, 78
Прусский А.И. 398
Пузачев А.Д. 282
Пустовалов А.В. 390
Путилин А.Н. 42
Путилин Н.А. 42
Пухтеев А.О. 358, 360
Пчелкин Г.А. 452, 484
Пчелкина Н.В. 524, 526
Пшеничнюк И.А. 52

-Р-

Рабенандрасана Ж. 530
Равин А.Р. 390
Разумов В.Ф. 74, 76
Райасекара Ч.Л.Б. 121
Рамакоти Р.Ш. 344
Расковская И.Л. 568
Растрыгин Д.С. 604
Расулев Р.П. 462
Резник И.А. 250
Ремзов А.Д. 161
Рогов С.А. 637
Рогожников Г.С. 384, 436, 440
Родин В.Г. 649, 653
Розанов К.А. 110
Романов Р.И. 30
Ронгонен С.Л. 376
Ропот П.И. 38
Рудой К.А. 562
Ружицкая Д.Д. 426
Рулев О.А. 96
Рунина К.И. 290
Рутковская Л.С. 352, 354, 366, 368
Рушинова И.И. 48
Рыбак А.А. 434
Рыбалтовский А.А. 34
Рыжиков П.С. 159

Рыжиков С.Б. 586
Рыжикова Ю.В. 586
Рыжов А.В. 242
Рымов Д.А. 232, 639, 645, 647
Рябочкина П.А. 262
Рядченко А.Е. 145
Рябков Р.В. 88
Ряховский Д.В. 34, 163

-С-

Савельев М.В. 161
Савельева А.А. 536
Савин В.В. 165, 472, 476, 486
Савченков Е.Н. 58
Саеченкова Е.А. 651
Сагателян Г.Р. 66
Саенко С.В. 344
Саечников А.В. 177
Саечников В.А. 177
Саечников И.В. 230
Сазонкин С.Г. 104
Саламатин Д.А. 554
Салахов М.Х. 318
Салахутдинов Г.Х. 344
Салова А.В. 592, 635
Салхаб М. 121
Самагин С.А. 36
Самородов А.В. 66
Самсонова Л.Г. 244
Самышкин В.Д. 274
Санникова М.Д. 256, 258, 260
Сантьев А.А. 514
Саратовский А.С. 254
Саченко Д.В. 114
Свистунов А.С. 647
Сгибнев Е.М. 256, 258, 260
Севид Ф.А. 252
Седова Ю.К. 382
Селезнев Л.В. 392
Селюков А.С. 242, 278
Семенов А.П. 556, 560
Семенова И.В. 592, 596, 635
Семенцов Д.И. 446
Семёнов С.Л. 458
Семин Н.С. 392
Семисалов Д.В. 502
Сеник К.А. 510
Сенникова Д.В. 127
Сергеев М.М. 127, 362

Сигаев В.Н. 123
Сидоров А.И. 238, 296, 298
Сидоров Г.Ю. 304
Сидоров Н.В. 404, 408
Сидорова А.Д. 110
Сингх Р. 183
Синев Д.А. 110
Синицын Д.В. 96
Синько А.С. 64
Скакун В.В. 230
Скиданов Р.В. 40
Сковородкина М.В. 480
Скориков М.Л. 278
Скрипаль А.В. 198, 218
Скрыбыкина А.А. 384
Слобожанинов А.А. 260
Смаев М.П. 356
Смирнов А.С. 52
Смирнов М.В. 404
Смирнова В.В. 127
Смольский А.А. 370, 380
Смолянская О.А. 192
Соболев К.В. 522
Соколенко Б.В. 336
Соколов Ю.М. 538
Соле Р.М. 394
Соловьев В.Г. 432
Солодова Т.А. 386
Соломашенко А.Б. 600
Сосунов А.В. 400
Спиридонов С.И. 196
Средин В.Г. 344, 444
Стариков Р.С. 204, 232, 643, 647
Стафеев С.С. 157
Степанов А.Р. 222
Степанов В.С. 420
Столярова В.Л. 254
Сторожев С.А. 482
Стоякин В.В. 538
Строганов Ю.В. 544
Субботин К.А. 394
Судас Д.П. 173, 482
Суханов А.Е. 60
Сычев В.В. 86
Сюй А.В. 30, 578

-Т-

Тазиев К.Р. 52

Тарасов И.П. 123
Тареева М.В. 106
Тедеева В.В. 594
Телешевский В.И. 556, 560
Тельминов Е.Н. 386
Теплякова Н.А. 404
Терещенко Н.В. 151
Тер-Нерсесянц Е.В. 452
Тетерин Е.П. 590
Тетерин П.Е. 590
Тимофеев И.В. 143
Титов А.И. 394
Титов Р.А. 404
Титовец П.А. 370, 380
Тихоновский Г.В. 30
Тишкин В.О. 582
Токко О.В. 398
Толстик А.Л. 48
Торопов Н.А. 82
Третьяков Д.А. 204
Третьяков С.А. 420
Тропин А.Н. 576
Трофимов Н.С. 516, 518, 530
Трушин С.М. 141
Тупяков Д.В. 520
Тынышова Т.Д. 629
Тырмышный В.А. 167, 372

-У-

У М. 106
Ужаков И.Н. 304
Ульянова О.В. 218
Уманская С.Ф. 106
Умаров М.Ф. 396, 402, 406
Ус Н.А. 570
Усачев К.П. 524
Усиевич Б.А. 538
Утюшев А.Д. 80
Учанова Д.Д. 56
Ушаков Н.А. 169
Ушакова Е.В. 72

-Ф-

Фазлиев Т.Ш. 643
Федоренко А.Ю. 104
Федоров В.А. 500
Федоров П.П. 262
Федорова В.А. 218
Федюк М.О. 380, 458

Филатов А.Л. 214
Филатов В.В. 322, 328
Фокина М.А. 330
Фотиади А.А. 34
Фролов А.А. 458

-Х-

Хавронин М.Е. 147
Халилов С.И. 534
Халяпин В.А. 540
Харинцев С.С. 84, 102, 139, 300, 306,
318
Харисова Р.Д. 260
Харитонов А.В. 139, 306
Харитонов Д.Ю. 627
Харитончик Р.А. 358, 360
Хижняков Ю.Н. 462
Хило Н.А. 38
Хлусевич Д.С. 502
Холина М.С. 364
Хомутинникова Л.Л. 488
Холёрский А.Н. 320
Хомченко Н.В. 494
Хорьков К.С. 30
Хохлов А.В. 452
Храмов Э.А. 616

-Ц-

Царева А.М. 548
Цветков А.В. 432
Цветков В.Б. 390
Цветков М.В. 216
Целиков Г.И. 30
Целиков Д.И. 30
Циплакова Е.Г. 192
Цыпкин В.П. 167

-Ч-

Чаморовский Ю.К. 34, 163
Чемякова А.А. 548
Черешнев В.О. 220
Черёмхин П.А. 232, 625, 641, 645, 647,
649, 651, 653
Чернега Н.В. 106
Черников А.С. 30
Чернов Д.В. 248
Чернова Е.В. 394
Черногорова О.П. 98
Черных А.В. 200

Чернявская Э.А. 177, 230
Чехлова Т.К. 131, 390, 518
Чиж С.А. 524
Чинь Н.Х. 330, 332, 334
Чистяков А.А. 135, 438
Чмерева Т.М. 310
Чопард А. 192
Чувакова М.А. 58
Чувызгалов А.А. 171
Чэнь Г.-П. 143

-Ш-

Шадрина Г.В. 137
Шакиров Н.И. 548
Шандаров С.М. 58, 412, 416, 606
Шарангович С.Н. 604, 608
Шаховой Р.А. 516, 518
Шевченко М.А. 106
Шевченко О.Н. 422
Шелеманов А.А. 264
Шепилова Е.М. 376
Шестериков А.В. 30, 78
Шилова И.В. 181
Шипило Д.Е. 145
Шипко В.В. 574
Шипунов Н.А. 558
Шитов С.А. 568
Шифрина А.В. 639
Шишкина А.С. 378
Шишова М.В. 600
Шкадаревич А.П. 616
Шкуратова В.А. 598
Шленов С.А. 190
Шуклов И.А. 68, 74, 76

Шукуров А.Х. 236

Шульга А.В. 181
Шур В.Я. 58
Шурупов Д.Н. 484
Шутов А.В. 96
Шутова О.А. 141, 149

-Щ-

Щербakov А.А. 80, 196
Щиголева Е.М. 290

-Э-

Эгамов М.Х. 46
Эгбали А. 286
Элабедин Г.З. 394
Эсанов Ш.А. 236
Эшбоев С. 236

-Ю-

Юсупов В.И. 94, 112, 117, 372
Ющицына В.В. 208

-Я-

Ягело А.Е. 334
Якимук В.А. 388
Яковенко Н.А. 474, 504
Яковлев М.И. 502
Якубовский Д.И. 129
Якушев М.В. 304
Якушенков П.О. 528
Якущева Г.Г. 173
Яндыбаева Ю.И. 82, 374
Яников М.В. 432
Янина Г.М. 568
Янукович Т.П. 478
Яценко А.В. 500