

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

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

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Москва

УДК 535(06)+004(06)
ББК 72г
Н 34

**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФОТОНИКЕ И
ИНФОРМАЦИОННОЙ ОПТИКЕ: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021.
– 496 с.**

Сборник научных трудов содержит доклады, включённые в программу X Международной конференции по фотонике и информационной оптике, проходившей 27-29 января 2021 г. 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 12 декабря 2020 года.
Материалы издаются в авторской редакции.

ISBN 978-5-7262-2733-7

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2021

Подписано в печать 20.01.2021. Формат 60×84 1/16.
Печ. л. 31. Тираж 60 экз. Заказ №1.

*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. – Корпорация IPG-Medical, Мальборо, США
- Вишняков Г.Н. – Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва
- Волостников В.Г. – Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
- Габитов И.Р. – Университет Аризоны, Тусон, США
- Десятников А.С. – Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия
- Козлов С.А. – Университет ИТМО, Санкт-Петербург
- Комоцкий В.А. – Российский университет дружбы народов, Москва
- Компанец И.Н. – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва
- Криштоп В.В. – Пермская научно-производственная приборостроительная компания
- Кульчин Ю.Н. – Институт автоматики 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. – Тель-авивский университет, Израиль
- Одинокос С.Б. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
- Потатуркин О.И. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Рябухо В.П. – Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
- Стариков Р.С. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
- Твердохлеб П.Е. – Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск
- Толстик А.Л. – Белорусский государственный университет, Минск
- Фетисов Ю.К. – 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

ГАБИТОВ И.Р., ГИБНИ Д., КУК И.А. Оптическая коммуникация в условиях перекрытия дисперсионно уширенных импульсов и внутриканального четырёхволнового взаимодействия.....	22
ЗИМНЯКОВ Д.А., ВОЛЧКОВ С.С., КОЧКУРОВ Л.А. Фундаментальные ограничения стохастической лазерной генерации во флуоресцирующих случайно-неоднородных средах.....	25
МИНАЕВ Н.В., ЖИГАРЬКОВ В.С., ЮСУПОВ В.И. Лазерная печать гидрогелевыми каплями с живыми микробиологическими объектами методом LIFT.....	27
ГОРОДЕЦКИЙ А.А. Компактные источники терагерцового излучения, работающие при комнатной температуре.....	29
КАБАНОВА О.С., РУШНОВА И.И., МЕЛЬНИКОВА Е.А., ТОЛСТИК А.Л. Управление световыми пучками планарными жидкокристаллическими элементами.....	31
ПОЖИДАЕВ Е.П., ТКАЧЕНКО Т.П., КУЗНЕЦОВ А.В., КОМПАНЕЦ И.Н. Электрооптическое переключение главной оптической оси спиральной наноструктуры в СЖК-дисплейной ячейке.....	33
ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А., ЧУВАКОВА М.А., КОЛКЕР Д.Б., БОЙКО А.А., ПАВЕЛЬЕВ В.С., СОКОЛОВСКИЙ Г.С. Нелинейно-оптические преобразования в сегнетоэлектрических кристаллах и тонких плёнках с регулярной доменной структурой.....	35
ХУДАЙБЕРГАНОВ Т.А., БУХАРОВ Д.Н., КУЧЕРИК А.О., АРАКЕЛЯН С.М. Разработка элементов логических систем на новых физических принципах с использованием подходов квантовой нанофотоники низкоразмерных топологических структур.....	37
КИНЯЕВСКИЙ И.О., КОВАЛЕВ В.И., ДАНИЛОВ П.А., СМИРНОВ Н.А., КУДРЯШОВ С.И., КОРИБУТ А.В., ДУНАЕВА Е.Е., ИОНИН А.А. Особенности вынужденного комбинационного рассеяния фемтосекундных лазерных импульсов в кристалле $BaWO_4$	39
ТИТОВ Р.А., ВОСКРЕСЕНСКИЙ В.М., ТЕПЛЯКОВА Н.А., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Влияние флюса B_2O_3 на особенности структуры и стехиометрию кристаллов $LiNbO_3:B$ (0.55, 0.69, 0.83 мол. % B_2O_3).....	41
СОСУНОВ А.В., ВОЛЫНЦЕВ А.Б. Стабильность интегрально-оптических схем на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов в зависимости от состояния приповерхностного слоя кристалла ниобата лития.....	43
СМИРНОВ М.В., СИДОРОВ Н.В., ПАЛАТНИКОВ М.Н., ПИКУЛЕВ В.Б. Фотолюминесценция в ближней ИК-области номинально чистых кристаллов ниобата лития, полученных по разным технологиям.....	45

САВЧЕНКОВ Е.Н., ШАНДАРОВ С.М., ДУБИКОВ А.В., КУЗЬМИЧ Д.Е., ШУР В.Я., АХМАТХАНОВ А.Р., ЕСИН А.А.	
Наблюдение линейности фотоиндуцированной проводимости регулярных доменных структур с наклонными стенками в ниобате лития.....	47
ГРИЩЕНКО И.В., СТИРМАНОВ Ю.С., КОНЯШКИН А.В., РЯБУШКИН О.А.	
Измерение коэффициентов оптического поглощения и рассеяния мощного лазерного излучения в кристаллах трибората лития.....	49
НОВОКОВСКАЯ А.Л., СЫЧУГИН С.А., БАКУНОВ М.И.	
Генерация сгустков квазистатических полей при оптической ректификации ультракоротких лазерных импульсов.....	51
КОСТЕНИКОВ М.А., БЕСПАЛОВ Н.С., КОЧЕТОВА В.В., ШМАКОВ С.С., ШАНДАРОВ С.М., БУРИМОВ Н.И.	
Вклад обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик при встречном взаимодействии световых пучков в кристалле среза (110).....	53
НАУМЕНКО Н.Ф., ЧИЖИКОВ А.И., ЮШКОВ К.Б., МОЛЧАНОВ В.Я.	
Анализ акустооптического взаимодействия неполяризованного излучения в кристалле $KY(WO_4)_2$	55
ТРЕТЬЯКОВ С.А., КАПЛУНОВ И.А., МОЛЧАНОВ С.В.	
Лазерный пробой в приповерхностном слое монокристалла парателлуриата....	57
КРИВЕНКОВ В.А., САМОХВАЛОВ П.С., НАБИЕВ И.Р., РАКОВИЧ Ю.П.	
Влияние эффекта Парселла на фотолуминесценцию квантовых точек вблизи самоорганизованных массивов плазмонных наночастиц.....	59
ИВАНОВ А.А., ЧАЛДЫШЕВ В.В.	
Экситон-поляритонное резонансное оптическое отражение периодической системой из 100 квантовых ям InGaN при комнатной температуре.....	61
БУРМИСТРОВ Е.Р., АВАКЯНЦ Л.П., ЧЕРВЯКОВ А.В.	
Пьезоэлектрическая релаксация двумерного электронного газа в светодиодах гетероструктурах InGaN/GaN.....	63
МАТРОСОВА А.С., КУЗЬМЕНКО Н.К., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., АСЕЕВ В.А., ДЕМИДОВ В.В., НИКОНОРОВ Н.В.	
Полюе антирезонансные световоды, модифицированные тонкоплёночными покрытиями с нанокристаллами $Gd_2O_3:Nd^{3+}$	65
ШИШКАНОВ О.Н., БОЙЧЕНКО А.П., ЯКОВЕНКО Н.А.	
Спектрально-оптические свойства наночастиц серебра, сформированных электрическим полем в полимерной матрице.....	67
ДЕРЕПКО В.Н., ОВЧИННИКОВ О.В., СМИРНОВ М.С., ЧЕВЫЧЕЛОВА Т.А., ГРЕВЦЕВА И.Г., ПЕРЕПЕЛИЦА А.С.	
Спектры экстинкции наночастиц золота, покрытых оболочками из SiO_2	69
САПАРИНА С.В., ХАРИНЦЕВ С.С.	
Эффекты усиления антистоксового комбинационного рассеяния света в аморфных углеродных наноплёнках.....	71

КАРМАНОВА Н.С., КРАСНОК А.Е. Режимы слабой и сильной связи в гибридных системах с использованием нелинейных двумерных полупроводников. Перестраиваемые метаповерхности.....	73
ЧЕРНЫХ Е.А., ХАРИНЦЕВ С.С. Фотоиндуцированный нагрев полимерной плёнки ПММА с помощью плазменной TiN наноантенны.....	75
КЛИШИН Ю.А., ЯКУБОВСКИЙ Д.И., МИШРА П., КОНДРАТЮК Е.В., ЕРМОЛАЕВ Г.А., МИРОНОВ М.С., СТЕБУНОВ Ю.В., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С. Поверхностное сопротивление ультратонких плёнок золота на монокристаллах дисульфида молибдена.....	77
ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., МАЛИНСКИЙ Т.В., МИКОЛУЦКИЙ С.И., РОГАЛИН В.Е., ФИЛИН С.А., ХОМИЧ Ю.В., ЯМЩИКОВ В.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И. Лазерное травление германия воздействием мощного ультрафиолетового импульса.....	79
ОСИПОВ А.В. Лазерный синтез наночастиц благородных металлов с помощью перестраиваемого узкополосного лазера на александрите.....	81
ЖИГАРЬКОВ В.С., МИНАЕВ Н.В., ЮСУПОВ В.И. Особенности переноса микроорганизмов в гелевых микрокаплях при лазерной биопечати.....	83
АНДРЕЕВ С.Н., МУХАНОВ С.А., ТАРАКАНОВ В.П. Расчётно-теоретическое исследование спектральных характеристик пучков протонов, ускоренных сверхинтенсивными лазерными импульсами.....	85
АКМАЛОВ А.Э., ЧИСТЯКОВ А.А., КОСТАРЕВ В.А., КОТКОВСКИЙ Г.Е. Методы повышения чувствительности спектрометра приращенной подвижности с лазерной ионизацией пробы для обнаружения сверхнизких концентраций паров взрывчатых веществ.....	87
СТЕПАНОВ И.А., ХЫДЫРОВА С., ВАСИЛЬЕВ Д.Д., МОЙСЕЕВ К.М. Расчёт времени отклика сверхпроводникового однофотонного детектора в зависимости от параметров плёнки $W_xSi_{(1-x)}$	89
АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ЧИСТЯКОВ А.А., ТКАЧУК А.П., ВЕРДИЕВ Б.И., АЛАТЫРЕВ А.Г. Возможность одновременного использования нескольких светодиодных источников возбуждающего излучения в проточном оптическом методе анализа биоаэрозолей.....	91
СТЕПАНОВ И.А., ХЫДЫРОВА С., ВАСИЛЬЕВ Д.Д., МОЙСЕЕВ К.М. Расчёт пороговой длины волны сверхпроводникового однофотонного детектора в зависимости от параметров плёнки $W_xSi_{(1-x)}$	93

МОГИЛЬНАЯ Т.Ю., ПАГАВА Л.Л. Исследование спектров второй гармоники ВРМБ коллоидных растворов наносеребра и биологических объектов, содержащих ДНК.....	95
КАСЬЯНЕНКО Е.М., ОМЕЛЬЧЕНКО А.И. Зависимость электропроводности хрящевой ткани от температуры при лазерном нагреве.....	97
ПУТИЛОВ А.Г. Исследование генерационных характеристик квантово-каскадного лазера среднего ИК-диапазона.....	99
КОРМАШОВА Д.И., ЗАЗЫМКИНА Д.А., ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., ЛАМПИН Ж.-Ф., МИТЯГИН Ю.А., САВИНОВ С.А., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В. Динамика генерации терагерцового NH_3 -лазера при оптической накачке излучением CO_2 -лазера.....	101
АНТИПОВ А.А. Многопрофильный перестраиваемый твердотельный лазер ближнего ИК-диапазона.....	103
ШАХОВОЙ Р.А., ТУМАЧЕК А.С., АНДРОНОВА Н.М., МИРОНОВ Ю.Б., КУРОЧКИН Ю.В. Анализ зависимости фазовой диффузии от параметров лазера, работающего в режиме переключения усиления.....	105
ШЕПЕЛЕВ А.Е. Управление временной формой импульсов для повышения эффективности функционального использования твердотельных лазеров.....	107
ВОХНИК О.М., КОРОЛЕНКО П.В., КУБАНОВ Р.Т. Оптический резонатор, возбуждаемый лазерным пучком с изменяющейся частотой.....	109
БЛИНОВ И.Ю., ПАВЛОВ В.И., ХАТЫРЕВ Н.П. Математическое моделирование терморепрактивных шумов в установке с оптическими микрорезонаторами.....	111
ВОРОПАЕВ К.О., ЖУМАЕВА И.О., ИОНОВ А.С. Исследование спектрального состава вертикально излучающих лазеров 1,31 мкм с различными размерами апертур.....	113
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОТКОВ А.А., САГИТОВА А.М., СИНИЦЫН Д.В. Широкополосные лазерные системы среднего ИК-диапазона.....	115
ХУСЯИНОВ Д.И., БУРЯКОВ А.М., ЗАЙНУЛЛИН Ф.А., ГОРБАТОВА А.В., МИШИНА Е.Д. Эмиссия терагерцового излучения с поверхности объёмного слоистого кристалла чёрного фосфора.....	117
САЗОНОВ С.В. Автосолитон в усиливающей среде с быстрой фазовой релаксацией.....	119

МАЙМИСТОВ А.И., ЛЯШКО Е.И., ЕЛЮТИН С.О. Полный угловой момент, переносимый нелинейной волной вдоль поверхности топологического изолятора.....	121
РЕШЕТНИКОВ Д.Д., ЛОСЕВ А.С. Возможность использования радиального числа лаггерр-гауссовых мод в задачах квантовой информатики.....	123
САЗОНОВ С.В., УСТИНОВ Н.В. Оптические солитоны в системе резонансно-квазирезонансных переходов...	125
АКИМОВ А.А., ГУЗАЙРОВ С.А., ИВАХНИК В.В. Качество обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии на тепловой нелинейности в схеме с обратной связью при больших коэффициентах отражения.....	127
ЕРМАКОВ О.Е., САМУСЕВ А.К., ГЛЫБОВСКИЙ С.Б., БОГДАНОВ А.А. Теоретическое и экспериментальное исследование поверхностных волн на анизотропных резонансных метаповерхностях.....	129
ЗОЛИНА К.А., ПЕРМИНОВ Н.С., МОИСЕЕВ С.А. Квантовая память на системе охлаждённых атомов цезия в фотонно-кристаллической пластине с новой геометрией элемента.....	131
ВАШУКЕВИЧ Е.А., ГОЛУБЕВА Т.Ю., ГОЛУБЕВ Ю.М. Преобразование мод с орбитальным угловым моментом в схеме квантовой памяти.....	133
ПЕТРОВ Н.И. Влияние частотной дисперсии на резонансное пропускание света в фильтре нарушенного полного внутреннего отражения.....	135
САВЕЛЬЕВ М.В., ИВАХНИК В.В. Четырёхволновое взаимодействие при различной концентрации растворённых в прозрачной жидкости наночастиц.....	137
САЕЧНИКОВ А.В., ЧЕРНЯВСКАЯ Э.А., САЕЧНИКОВ В.А., ОСТЕНДОРФ А. Измерение физических и химических параметров матрицами микрорезонаторов.....	139
АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КОЗЛОВСКИЙ К.И., МАКСИМОВ Е.М., ПЛЕХАНОВ А.А., ЧИСТЯКОВ А.А. Обнаружение органических веществ при помощи терагерцового радиовидения со спектральным разрешением.....	141
ЕРМАКОВ О.Е., ШНАЙДЕВИНД Х., ХУБНЕР У., ВИДУВИЛТ Т., ЦЕЙСБЕРГЕР М., БОГДАНОВ А.А., КИВШАРЬ Ю.С., ШМИДТ М.А. Рекордно эффективный захват света в оптоволокно при больших углах падения.....	143
ГИЛЕВ Д.Г., ЧУВЫЗГАЛОВ А.А., СТРУК В.К., КРИШТОП В.В. Волоконно-оптический датчик тока.....	145
САВЕЛЬЕВ Е.А., КУЗНЕЦОВ П.И., СУДАС Д.П., ЯКУЩЕВА Г.Г. Сенсоры на основе химически травленого оптического волокна с покрытием из ZnTe.....	147

МИНАЕВА Е.Д., МИНАЕВ Н.В. Исследования различий внутренней структуры трёхмерных структур, сформированных из порошков различных фракций методом поверхностно-селективного лазерного спекания.....	149
ПРОСОВСКИЙ О.Ф., ДЕНИСОВ Д.Г., ПРОСОВСКИЙ Ю.О. Разработка перспективных тонкоплёночных оптических покрытий типа GLAD для задач современной оплотехники.....	151
МЕРКУШЕВ Д.Д., МАТИТАЛ Р.П., ЗВАГЕЛЬСКИЙ Р.Д., КОЛЫМАГИН Д.А., ВИТУХНОВСКИЙ А.Г., ЧУБИЧ Д.А. Трёхмерные полимерные оптические межсоединения: изучение морфологии и пропускания.....	153
ДЕНИСОВ Д.Г. Современное состояние ОЭП регистрации спекл-модулированного поля в задачах контроля параметров формы и качества оптических поверхностей.....	155
ЗИНИН П.В., БУЛАТОВ К.М., МАЛЫХИНА И.В., БЫКОВ А.А. Калибровка спектральной чувствительности ПЗС-матриц.....	157
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С. Особенности применения лазерных генераторов фемтосекундных импульсов в схеме фотонного аналого-цифрового преобразователя с дисперсионным растяжением импульсов выборки.....	159
ПЕТРОВ В.М., ШАМРАЙ А.В., ИЛЬИЧЕВ И.В., ГЕРАСИМЕНКО Н.Д., ГЕРАСИМЕНКО В.С., АГРУЗОВ П.М., ЛЕБЕДЕВ В.В. Режимы работы амплитудных и фазовых СВЧ интегрально-оптических модуляторов.....	161
ГРИШАЧЕВ В.В. Анализ каналов утечки информации в волоконно-оптических линиях связи: оптическое туннелирование.....	163
ПЛЁНКИН А.П., ЗОРИН Р.С., НГУЕН Б.Х., РОСТЕНКО Д.С. Экспериментальные исследования затуханий в квантовом канале связи при использовании медиаконвертеров.....	165
БЛИНОВ И.Ю., РАКОВ А.А., ХАТЫРЁВ Н.П. Математическое моделирование корреляционной обработки псевдослучайных сигналов в лазерном дальномере.....	167
ГРЕЙСУХ Г.И., ЕЖОВ Е.Г., ЗАХАРОВ О.А., КАЗИН С.В. Влияние побочных дифракционных порядков на качество изображения, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой среднего ИК-диапазона.....	169
МИРОШНИКОВА Н.Е., ТИТОВЕЦ П.А., ЛИПАТКИН В.И., КУЛЕШОВ А.Н. Экспериментальные исследования подводного оптического канала связи.....	171
РОМАШКО Р.В., КУЛЬЧИН Ю.Н., СТОРОЖЕНКО Д.В., БЕЗРУК М.Н. Векторно-фазовая оптоволоконная гидроакустическая система.....	173

ЕПИХИН В.М., КАРНАУШКИН П.В., РЯБИНИН А.В., МАЗУР М.М., МАЗУР Л.И.	
Акустооптические модуляторы-частотосдвигатели с волоконными выводами.....	175
ОБЫДЕННОВ Д.В., ЮШКОВ К.Б., МОЛЧАНОВ В.Я.	
Разработка оптической ловушки с кольцевым потенциалом.....	177
БЫКОВСКИЙ А.Ю.	
Избыточные данные в многозначно-логической модели сетевого агента.....	179
ПАВЛОВ А.В.	
Моделирование принятия решений методом голографии Фурье: влияние нелинейности записи голограмм на выбор альтернатив.....	181
ПЕТРОВА Е.К., СТАРИКОВ Р.С., ЗЛОКАЗОВ Е.Ю.	
Эксперименты по корреляционному распознаванию изображений, полученных из произвольных источников.....	183
КРАЙСКИЙ А.В., МИРОНОВА Т.В.	
Оценка упорядоченности поперечной структуры фотонных кристаллов.....	185
ГУРОВ И.П., ВОЛЫНСКИЙ М.А., МАРГАРЯНЦ Н.Б., ПИМЕНОВ А.Ю.	
Динамическое оценивание трёхмерной структуры объектов с использованием оптического когерентного томографа в режиме асинхронного сканирования.....	187
КОЖЕВНИКОВА А.М., ИВАНКОВ А.С., АЛЕКСЕЕНКО И.В., ШИТЦ Д.В.	
Цифровая голографическая интерферометрия для исследования параметров струи нетермальной плазмы в импульсном режиме генерации.....	189
СОКОЛОВ П.П., ВОРЗОБОВА Н.Д.	
Дифракционные элементы для голографических солнечных концентраторов.....	191
ИСМАИЛ Р., ПИСКУНОВ Д.Е.	
Вариосистема на базе перестраиваемых линз.....	193
КАЛИНИНА А.А., ПУТИЛИН А.Н.	
Клиновидные волноводы в изображающих устройствах.....	195
ШИШОВА М.В., ОДИНОКОВ С.Б., ЖЕРДЕВ А.Ю., ЛУШНИКОВ Д.С., МАРКИН В.В.	
Запись мультиплексных брэгговских решёток с помощью фазовых масок для световодов дополненной реальности.....	197
ФАЗАЛОВА Э.К., КОЧУНОВ К.В., БОДЯГО Е.В., КОНОПЛЕВ Г.А., МУХИН Н.В., СОКОЛОВА И.М., ЧИГИРЕВ Д.А., ЗИМИНОВ А.В., РУДАЯ Л.И., ЛЕБЕДЕВА Г.К.	
Исследование оптических и фотоэлектрических свойств сенсibilизированного фталоцианином поли (о-гидроксиамида) как перспективного материала для солнечных элементов.....	199
СМИРНОВ А.П., ГОРЯЕВ М.А., ЛУЖКОВ А.А.	
Пути сенсibilизации красителями структуры стеарат серебра – бромид серебра.....	201

АРЕШКИН А.Г., КОМАРОВА О.С., ЛЕНТОВСКИЙ В.В., ФЕДОРОВ Д.Л. Влияние неупорядоченной структуры твёрдых растворов полупроводников A_2B_6 на экситонные свойства.....	203
ЭЛСАЙЕД М.А., ДОРОШИНА Н.В., НОВИКОВ С.М., ВИШНЕВЫЙ А.А., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С. Анализ спектров комбинационного рассеяния света ван-дер-ваальсовых гетероструктур дисульфида молибдена.....	205
КУЛЬПИНА Е.В., БАБКИНА А.Н., ЗЫРЯНОВА К.С. Исследование влияния лития на люминесцентные свойства хромсодержащей боратной стеклокерамики.....	207
ОВЕЧЕНКО Д.С., БОЙЧЕНКО А.П. Управление электролизным формированием оксидов металлов по их электролюминесценции.....	209
МАКУРИН А.А., КОЛОБКОВА Е.В. Исследование спектрально-люминесцентных свойств нанокристаллов перовскита цезия во фторофосфатном стекле.....	211
ДОРОШИНА Н.В., СТРЕЛЕЦКИЙ О.А., СЫЧЕВ В.В., НЕМЦОВ А.Б., МИРОНОВ М.С., ВОРОНОВ А.А., АРСЕНИН А.В., ВОЛКОВ В.С., НОВИКОВ С.М. Ионно-лучевой метод создания серебряных наноструктур для сенсорных приложений.....	213
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МИХАЙЛОВ Н.Н., СИДОРОВ Г.Ю. Темновые токи бариодных структур на основе теллурида кадмия ртути для средне- и длинноволновых инфракрасных детекторов.....	215
КОЛЧИН А.В., ЗАБОТНОВ С.В., ОРЛОВ Д.В., ШУЛЕЙКО Д.В., ГОЛОВАНЬ Л.А., ПРЕСНОВ Д.Е., ЛАЗАРЕНКО П.И., КОЗЮХИН С.А., КУНКЕЛЬ Т.С., КАШКАРОВ П.К. Фемтосекундное многоимпульсное лазерное структурирование аморфных тонких плёнок $Ge_2Sb_2Te_5$ на диэлектрических подложках.....	217
АЙМУХАНОВ А.К., РОЖКОВА К.С., СЕЙСЕМБЕКОВА Т.Е. Влияние спиртового растворителя на морфологию плёнок PEDOT:PSS при отжиге в вакууме.....	219
КАЗАКОВ В.А., КОКШИНА А.В., РАЗИНА А.Г. Исследование оптических свойств плёнок углерода в SP , SP^2 , SP^3 -гибридизованном состоянии при термическом отжиге.....	221
АЙМУХАНОВ А.К., ОМАРБЕКОВА Г.И., КАМБАР Д.С. Исследование фазовых состояний нанолент $CoPc$ и H_2Pc	223
БУЛЫГА Д.В., ЕВСТРОПЬЕВ С.К., КУЗЬМЕНКО Н.К. Полимерно-солевой синтез нанокристаллов иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами иттербия.....	225
СОКОЛОВА Д.А., КАЦАБА А.В., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ДАЙБАГЕ Д.С., ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А. Каскадно возбуждаемые электронные состояния в нанопластинах $CdSe$	227

ГРАНИСО Э.А., НАБИЕВ И.Р., КРИВЕНКОВ В.А. Усиление флуоресценции квантовой точки в плёнке ПММА вблизи серебряной нанопризмы.....	229
КАЦАБА А.В., СОКОЛОВА Д.А., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ВАСИЛЬЕВ Р.Б., ДАЙБАГЕ Д.С., ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А. Фотодеградация люминесценции коллоидных квантовых точек CdS/ZnSe.....	231
ВОЙЦЕХОВСКИЙ А.В., НЕСМЕЛОВ С.Н., ДЗЯДУХ С.М., ГОРН Д.И., ДВОРЕЦКИЙ С.А., МИХАЙЛОВ Н.Н. Адмиттанс МДП-приборов на основе теллурида кадмия ртути с одиночными квантовыми ямами теллурида ртути в активной области.....	233
ГАЗИЗОВ А.Р., ХАРИТОНОВ А.В., САЛАХОВ М.Х., ХАРИНЦЕВ С.С. Плазмонное усиление вынужденного комбинационного рассеяния света на плоской поверхности металлической плёнки.....	235
ДАЙБАГЕ Д.С., ОСАДЧЕНКО А.В., ЗАХАРЧУК И.А., СЕЛЮКОВ А.С., СОКОЛОВА Д.А., ДАНИЛКИН М.И. Проблемы оптического опустошения ловушек в $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ при наличии транспортного барьера для дырок.....	237
ОСАДЧЕНКО А.В., ДАЙБАГЕ Д.С., ЗАХАРЧУК И.А., СЕЛЮКОВ А.С., СОКОЛОВА Д.А., ДАНИЛКИН М.И. Радиационное разрушение $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ при комбинированном воздействии электронного пучка и лазерного излучения.....	239
ДЕВИЦКИЙ О.В., СЫСОЕВ И.А. Импульсное лазерное напыление гетероструктур InGaAsP/Si.....	241
ЗАХАРЧУК И.А., ОСАДЧЕНКО А.В., ДАЙБАГЕ Д.С., СЕЛЮКОВ А.С., СОКОЛОВА Д.А., ДАНИЛКИН М.И., ЕЛИСЕЕВ С.П., ГРАФОВА В.П., КЛИМОНСКИЙ С.О., ВАСИЛЬЕВ Р.Б. Изменение кинетики фотолюминесценции нанопластин и наносвитков CdSe в фотонном кристалле.....	243
КОРДЕЙРО МАГРИНЬО Д.А., КОРШУНОВ В.М., АМБРОЗЕВИЧ С.А., ТАЙДАКОВ И.В. Влияние состояний переноса заряда с лиганда на металл на эффективность сенсibilизации люминесценции иона европия (III) в координационных соединениях иона европия (III)	245
БИКБАЕВ Р.Г., РУДАКОВА Н.В., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В. Исследование гибридации таммовских плазмон-поляритонов с модами двумерных наноструктурированных сред.....	247
КРУЧИНИН Н.Ю., КУЧЕРЕНКО М.Г., РУСИНОВ А.П., НАЛБАНДЯН В.М. Конформационная перестройка полимерного окружения плазмонной наночастицы в сверхвысокочастотном электрическом поле.....	249
ДЕМИШКЕВИЧ Е.А., ЗЮБИН А.Ю., ХАНКАЕВ А.А., АРТАМОНОВ Д.А., САМУСЕВ И.Г. Формирование монодисперсных платиновых наночастиц методом фемтосекундной лазерной абляции.....	251

ЧМЕРЕВА Т.М., КУЧЕРЕНКО М.Г., МУШИН Ф.Ю. Нелинейное отражение света от монослоя плазмонных наночастиц.....	253
ИЛЬИНСКИЙ А.В., КАСТРО Р.А., ПАШКЕВИЧ М.Э., ПОПОВА И.О., ШАДРИН Е.Б. Эллипсометрия гистерезисных явлений при фазовом переходе изолятор-металл в плёнках VO ₂	255
ГОРБАТОВА А.В., БУРЯКОВ А.М., ИВАНОВ М.С. Фазовый переход сегнетоэлектрик-параэлектрик в новом органическом магнитоэлектрическом комплексе на основе соединения YbZn.....	257
БИКБАЕВ Р.Г., ВЕТРОВ С.Я., ТИМОФЕЕВ И.В., ШАБАНОВ В.Ф. Таммовские плазмон-поляритоны для захвата света в органических солнечных элементах.....	259
ЛИВАШВИЛИ А.И., ВИНОГРАДОВА П.В., КРИШТОП В.В., МАНЖУЛА И.С., ЯКУНИНА М.И. Моделирование процессов поглощения лучистой энергии наножидкостью в солнечном коллекторе.....	261
ГОРБАТОВА А.В., БУРЯКОВ А.М., МИШИНА Е.Д. Расчёт эффективности фотодетекторов на основе двумерных полупроводников с плазмонным усилением.....	263
ЖЕЛТИКОВ В.А., ХЫДЫРОВА С., ВАСИЛЬЕВ Д.Д., МОИСЕЕВ К.М. Сравнение материалов волноводов для квантовых оптических интегральных схем.....	265
МАНДУР М.М., АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А. ФотоЭДС в одно- и двухкамерной фотоплазменных ячейках в смеси Na-Ag.....	267
МАНДУР М.М., АСТАШКЕВИЧ С.А., КУДРЯВЦЕВ А.А. Генерация фотоЭДС в фотоплазменной ячейке, содержащей различные смеси паров натрия и инертных газов.....	269
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В., АНДРЕЕВА О.Б. Расщепление фотона в поле атомного иона.....	271
СКОРКИН В.М. Распространение фотонов в нанокompозите ДНК-Au при каналировании электронов.....	273
ХОПЁРСКИЙ А.Н., НАДОЛИНСКИЙ А.М., КОНЕЕВ Р.В. О поляризации тормозного излучения при резонансном комптоновском рассеянии фотона атомом.....	275
ВИКТОРОВ Е.А., ПАСТОР А.А., СЕРДОБИНЦЕВ П.Ю., БЕЗУГЛОВ Н.Н., МИЧУЛИС К., РЯБЦЕВ И.И. Осцилляции фототоков при фотоионизации поляризованных атомов Ag и Xe в магнитных полях.....	277
ПИЧКУРЕНКО С.В., ФИЛАТОВ В.В. Вынужденная (стимулированная) генерация гравитационных волн в резонансной твердотельной микрополости.....	279

КОЖЕВНИКОВ В.А., ПРИВАЛОВ В.Е.	
Мощность излучения He-Ne лазера с сечением трубки в виде эллипса.....	281
АЛЕКСЕЕВ Е.Е., АНДРОНОВА Н.М., КАЗАНЦЕВ С.Ю.	
Расчёт порога развития паразитной генерации в дисковых Fe:ZnSe лазерах при неоднородном распределении легирующей примеси.....	283
СЕДОВА Ю.К., МИНАЕВА С.А., МИНАЕВ Н.В., МИНАЕВА Е.Д., ИВАНОВСКАЯ Е.В., ДЕМИНА Т.С.	
Исследование распределения наночастиц гидроксипатита в объёме полимерных микрочастиц методом спектроскопии комбинационного рассеяния.....	285
АЛЕКСЕЕНКО Н.А., КОВАЛЕНКО М.Н., МАРКОВА Л.В., ЗАЖОГИН А.П.	
Процессы образования нанодисперсных порошков Al_2O_3 с углеродом в электрической дуге постоянного тока.....	287
БАЗЗАЛ Х., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., ПАТАПОВИЧ М.П., ЗАЖОГИН А.П.	
Процессы образования нанопорошков Al_2O_3 при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха.....	289
БАЗЗАЛ Х., АЛЕКСЕЕНКО Н.А., ВОРОПАЙ Е.С., КОВАЛЕНКО М.Н., ЧИНЬ Н.Х., ЗАЖОГИН А.П.	
Процессы образования оксидированных нанопорошков алюминия при воздействии на алюминий короткими сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха.....	291
ШКУРАТОВА В.А., КОСТЮК Г.К., СЕРГЕЕВ М.М.	
Изготовление двулучепреломляющей фазовой пластины лазерно-индуцированной микроплазмой для генерации векторных пучков..	293
ИОНИН А.А., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КЛИМАЧЕВ Ю.М., КОЗЛОВ А.Ю., КОМАРОВ Д.А., РУЛЕВ О.А., СИНИЦЫН Д.В.	
Внутрирезонаторная генерация суммарных частот излучения СО-лазера с ВЧ-накачкой в нелинейном кристалле $ZnGeP_2$	295
ЖЕЛЕЗНОВ В.Ю., МАЛИНСКИЙ Т.В., МИКОЛУЦКИЙ С.И., РОГАЛИН В.Е., ФИЛИН С.А., ХОМИЧ Ю.В., ЯМЩИКОВ В.А., КАПЛУНОВ И.А., ИВАНОВА А.И.	
Лазерное травление бронзы воздействием мощных ультрафиолетовых импульсов.....	297
ГЕРАСИМОВА Ю.А., ГРУДЦЫН Я.В., КИНЯЕВСКИЙ И.О., КОРИБУТ А.В., РОГАШЕВСКИЙ А.А.	
Формирование спектра для генерации разностной частоты в средний ИК-диапазон.....	299
КАЗАНЦЕВ С.Ю., ТИТОВЕЦ П.А., САТТАРОВА А.И.	
Приёмопередаточные характеристики фоторезистора с лазерным управлением.....	301
СРЕДИН В.Г., САХАРОВ М.В., КОНРАДИ Д.С., КУЗНЕЦОВ И.В.	
Численное моделирование тепловых полей в матричном ИК-фотоприёмнике в поле лазерного излучения.....	303

БОРОВЫХ С.В., МИТЮРЕВА А.А., СМИРНОВ В.В. Расчёт деградации картины дифракции мощного, ультракороткого рентгеновского излучения на H_2^+	305
ВАРЛАМОВ П.В., САМОХВАЛОВ А.А., ИЗМАЙЛОВ Д.В. Исследование процессов абляции карбида кремния лазерно-плазменным методом.....	307
ГАВРИШ С.В., КУГУШЕВ Д.Н., ПУГАЧЕВ Д.Ю., ПУЧНИНА С.В. Изменение оптических свойств легированных кварцевых оболочек импульсных ламп под воздействием излучения ксеноновой плазмы.....	309
МАТВЕЕВА К.И., ЗОЗУЛЯ А.С., ОГНЕДЮК А.А., ЗЮБИН А.Ю., САМУСЕВ И.Г. Варьирование оптических свойств плазмонных структур для целей фотодинамической терапии.....	311
МАСЛОВА Г.Т., ТИТОВА А.В., ЗАЖОГИН А.П., ПАТАПОВИЧ М.П. Морфоструктурный анализ и лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия фаций капель плазмы крови в диагностике опухолей головного мозга.....	313
РОЩИНА Н.В., КОНОПЛЕВ Г.А., СТЕПАНОВА О.С., КУЗНЕЦОВ А.И., ФРОРИП А., КОРСАКОВ В., ЗЕМЧЕНКОВ Г.А. Оптико-электронная система мониторинга элиминации среднемолекулярных маркеров уремии в процессе гемодиализа.....	315
БАСКО Е.А., МАКАРОВ В.И., КАШТАНОВА М.С., МОРОЗОВА Н.С., ЛОЩЕНОВ В.В. Оптико-спектральная оценка оксигенации гемоглобина и уровня кровенаполненности в тканях пародонта.....	317
НЕЧИПУРЕНКО Н.И., ПРОКОПЕНКО Т.А., ПАШКОВСКАЯ И.Д., ЗАЖОГИН А.П., ПАТАПОВИЧ М.П. Применение морфологии и ЛАЭМС высохших капель плазмы крови в диагностике пациентов с ДЭ головного мозга.....	319
РОГОЖНИКОВ Г.С., ЛЮБЫНСКАЯ Т.Е. Разработка комплекса инвазивной малотравматичной оптической биопсии..	321
ПОЛЕТАЕВ Д.А., СОКОЛЕНКО Б.В. О возможной фотоактивации вирионов коронавирусной инфекции.....	323
АКМАЛОВ А.Э., КОТКОВСКИЙ Г.Е., КУЗИЩИН Ю.А., МАРТЫНОВ И.Л., ОСИПОВ Е.В., ЧИСТЯКОВ А.А., ТКАЧУК А.П., ВЕРДИЕВ Б.И., АЛАТЫРЕВ А.Г. Использование режима счёта фотонов в проточном оптическом методе анализа биоаэрозолей.....	325
ВАНЮШИН М.В., НОСОВ П.А., ЗИНИН П.В. Моделирование упругих свойств биологических микрообъектов.....	327
СОСНОВА Н.С., ВАСИЛЬЕВА А.В., ПАРФЕНОВ В.А. Применение рентгенофлуоресцентной спектроскопии для определения химического состава пигментов русских икон XVI – XIX веков.....	329

ПЕРИН А.С., БОДРЕНИН В.Е., ЩУКИН А.В. Исследование затухания оптического излучения с длиной волны 850 нм в канальном оптическом волноводе на основе ниобата лития.....	331
ГАЛУЦКИЙ В.В., ПОНЕТАЕВА И.Г., ПУЗАНОВСКИЙ К.В., СТРОГАНОВА Е.В. Спектрокинетические исследования керамики $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ на подложках LiNbO_3	333
КОСТРИЦКИЙ С.М., КОРКИШКО Ю.Н., ФЕДОРОВ В.А., СЕВОСТЬЯНОВ О.Г., ЧИРКОВА И.М. Зависимость свойств протонно-обменных волноводов от стехиометрического состава кристаллов LiNbO_3	335
ПИКУЛЬ О.Ю., СИДОРОВ Н.В., ТЕПЛЯКОВА Н.А., ПАЛАТНИКОВ М.Н. Оптическая однородность кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ (0.55 - 1.24 мол. %).....	337
ГАЛУЦКИЙ В.В., СТРОГАНОВА Е.В., ШМАРГИЛОВ С.А., ЯРМАК П.А. Влияние градиента лития на эффективность преобразования с помощью PPLN.....	339
ПИЛЯК Ф.С., КУЛИКОВ А.Г., ФРИДКИН В.М., ПИСАРЕВСКИЙ Ю.В., МАРЧЕНКОВ Н.В., БЛАГОВ А.Е., КОВАЛЬЧУК М.В. Обнаружение и исследование объёмного пьезофотовольтаического эффекта в кристаллах ниобата лития, легированных железом.....	341
ПУЗАНОВСКИЙ К.В., ШЕЛКОВОЙ В.Е., СТРОГАНОВА Е.В. Подготовка образцов керамики LiNbO_3 с органическими включениями с помощью терагерцового излучения.....	343
ПЕРЕВОЩИКОВ Д.А., КАЛУГИН А.И., АНТОНОВ Е.А. Влияние гидростатического сжатия на электронную структуру кристалла InSb	345
ЖУРИН Т.А., КИСТЕНЕВА М.Г., ШАНДАРОВ С.М., ДЮ В.Г., КАРГИН Ю.Ф. Численное моделирование дифференциальных характеристик спектров пропускания кристалла $\text{V}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca,Ga}$	347
КРОЛЬ И.М., БАРИНОВА О.П., ЗЫКОВА М.П., ПЕТРОВА О.Б. Исследование спектров поглощения в видимой и ИК-областях кобальтсодержащего цинкборосиликатного стекловидного материала.....	349
БОГАЧКОВ И.В., СТАРКОВ А.С. Улучшение приборов для прогнозирования состояния оптических волокон.....	351
ЛУЦЕНКО А.С., РАХМАТУЛЛИНА А.Р., ГРАЧЁВ Н.А. Исследование параметра: воспроизводимость устройства опроса квазираспределённого чувствительного элемента.....	353
БОГАЧКОВ И.В., СТАРКОВ А.С., ДЫШЛЕВСКИЙ В.А. Изучение влияния изгибов оптических волокон на рефлектограммы.....	355
БОГАЧКОВ И.В., ТЮЛЕНЕВ А.С. Программа для автоматизированной обработки бриллюэновских рефлектограмм оптических волокон.....	357

БОГАЧКОВ И.В., ДЫШЛЕВСКИЙ В.А. Улучшение алгоритмов определения натяжения оптических волокон в бриллиантовых рефлектометрах.....	359
ТАРАСОВ С.А., РАДЗИЕВСКАЯ Т.А., ИВАНОВ Н.Н. Технологические способы снижения потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах.....	361
БОГАЧКОВ И.В., ХОМЧЕНКО А.В. Разработка программы для изучения влияния поляризационных потерь на уровень принятого сигнала.....	363
КОТЛИКОВ Е.Н., ЛАВРОВСКАЯ Н.П., ТРОПИН А.Н. Металлодиэлектрические интерференционные фильтры для датчиков открытого пламени.....	365
НИКИТИН В.А., СЕРДЮКОВ В.В., ЯКОВЕНКО Н.А. Разработка и изготовление заглубленных разветвителей 1×8 в стеклянных подложках.....	367
КОСЫРЕВ А.В., РУЖИЦКАЯ Д.Д., КОРОЛЕНКО П.В., РЫЖИКОВА Ю.В. Фрактальные свойства нанокластерных объектов с дендритной структурой.....	369
САРАФАННИКОВА А.В., ГАРИФУЛЛИН А.И., ГАЙНУТДИНОВ Р.Х. Расчёт зонной структуры одномерных фотонных кристаллов методом плоских волн и методом матриц распространения.....	371
МИНИН И.В., МИНИН О.В. Фотонный крючок: новый субволновой структурированный самоизгибающийся волновой пучок.....	373
ГОШЕВ А.А., ЕСЕЕВ М.К., МАКАРОВ Д.Н. Вторая гармоника в спектре рассеяния ультракоротких импульсов на углеродных наноматериалах.....	375
ХАЛЯПИН В.А., БУГАЙ А.Н. Об устойчивости оптических филаментов, распространяющихся в режиме ионизации.....	377
ПЕТРОВ Н.И., ПУСТОВОЙТ В.И. Малогобаритный интерферометр с резонаторами Фабри-Перо в качестве отражающих зеркал для регистрации гравитационных волн.....	379
КОТОВ В.М., АВЕРИН С.В. Двухцветное излучение с поляризациями, вращающимися в противоположные стороны.....	381
ИСМАЙЛОВ И.А. Управление орбитальным угловым моментом световых пучков с помощью оптических волокон.....	383
ВЕНЕДИКТОВ И.О., ЕЛЕЗОВ М.С., ПРОХОДЦОВ А.И., КОВАЛЮК В.В., АН П.П., ГОЛИКОВ А.Д., ЩЕРБАТЕНКО М.Л., СЫЧ Д.В., ГОЛЬЦМАН Г.Н. Использование фазовых модуляторов на термооптическом эффекте для перестраиваемого интерферометра на чипе.....	385

БУЛАТОВ К.М., ХРАМОВ Н.А., НОСОВ П.А., ЗИНИН П.В. Мультиспектральное измерение распределения температуры образцов с неизвестной излучательной способностью.....	387
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А. Прибор ночного видения с теплообнаружителем.....	389
ЗОЛОТОВСКИЙ И.О., ЛАПИН В.А., СЕМЕНЦОВ Д.И. Генерация частотно-модулированных волновых пакетов в усилителях с бегущей волной показателя преломления.....	391
БАЛАН Н.Н., ИВАНОВ В.В., ПАНКРАТОВ А.Л. Метод расчёта допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблонов для проекционной фотолитографии.....	393
ВЕКШИН М.М., ЯКОВЕНКО Н.А. Особенности модового состава субмикронного As_2S_3 волновода.....	395
ВОЛКОВ В.Г., ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., КУЗНЕЦОВ С.А. Прицельный комплекс.....	397
БАЛАКИРЕВА И.В., БЛИНОВ И.Ю., ХАТЫРЕВ Н.П. Гравиметр на оптических резонаторах с модами шепчущей галереи.....	399
АНДРЕЕВ С.Н., КАЗАНЦЕВ С.Ю., МУЗЫЧКА А.Ю. Датчик волнового фронта широкоапертурных лазерных пучков.....	401
ДЕНИСОВ Д.Г., ЗОЛОТУХИНА А.А., КУДРЯШОВ А.В., НИКИТИН А.Н. Сравнительный анализ методов калибровки датчика волнового фронта Шэка-Гартмана.....	403
УС Н.А., АВЕРШИН А.А., МУРАВЛЕВ М.В. Показатели качества оптической схемы кольцевого моноблочного гирскопа.....	405
ЗАГОРУЛЬКО К.А., ВОСКАНОВ М.Л., КОЗЛОВ А.В., ХАТЫРЕВ Н.П. Экспериментальное определение спектральной ширины линии узкополосных лазеров.....	407
ЗЛОКАЗОВ Е.Ю., НЕБАВСКИЙ В.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Повышение линейного диапазона линеаризованных схем с двойным параллельным модулятором Маха-Цандера.....	409
ТРЯПИЦЫН В.Л., КРУГЛОВ С.К. Система сжатия данных по протоколу LZW для акустооптического анализатора спектра.....	411
ЗАЧИНЯЕВ Ю.В., ШТОКОЛОВ А.А., ГУДКОВА Ю.А. Структурные схемы передающего и приёмного модулей системы взаимодействия автомобилей на основе технологии VLC.....	413
БРЕЦЬКО М.В., АКимова Я.Е., БРЕЦКО В.В. Восстановление структуры спиральных пучков света после случайных фазовых искажений.....	415

КУЛАКОВ М.Н., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Исследование устойчивости однопиксельного детектирования с применением сжатого зондирования к пространственным потерям регистрируемой интенсивности.....	417
БУСУРИН В.И., ШТЕК С.Г., ЖЕГЛОВ М.А., КОРОБКОВ К.А., КОШЕВАРОВА Н.А. Анализ погрешностей компенсационного преобразователя ускорения с дифференциальным оптическим считыванием.....	419
ЕФИМОВ Т.А., ДАЦ Е.П., РАССОЛОВ Е.А., МАЛОХАТКО М.С. Моделирование колебаний микроперфорированных мембран для гидроакустического приёмника.....	421
БУСУРИН В.И., ВАСЕЦКИЙ С.О., ШТЕК С.Г., ЖЕГЛОВ М.А. Экспериментальное исследование характеристик преобразователя перемещений на основе оптического туннельного эффекта.....	423
СУЕТИН Н.В. Характеристики датчика малых угловых перемещений, построенного с применением системы из двух фазовых дифракционных решёток.....	425
ПАВЛОВ И.Н., ЦВЕТКОВ М.В. Возможные способы повышения чувствительности метода нарушенного полного внутреннего отражения.....	427
РОМАШКО Р.В., БЕЗРУК М.Н., БОБРУЙКО Д.А. Детектирование акустического поля в конструкционном материале с помощью адаптивной оптоволоконной томографической системы.....	429
ВЕДЯШКИНА А.В., РАСКОВСКАЯ И.Л., ПАВЛОВ И.Н. Применение метода каустик для исследования процессов тепло- и массопереноса в жидкостях.....	431
АКИМОВА Я.Е., БРЕЦЬКО М.В., БРЕЦКО В.В. Цифровой метод измерения амплитуд радиальных мод пучков Лагерра-Гаусса после дифракции на круглом отверстии.....	433
ЗАБАЛУЕВА З.А., КОТОВ О.И., ВЕЛЮХОВА О.Ю., ВЕЛИЧКО Е.Н. Сравнение методов автокорреляции и взаимной корреляции для оценки размеров частиц.....	435
СОКОЛЕНКО Б.В., ШОСТКА Н.В., ПОЛЕТАЕВ Д.А. Метод бесконтактной интерференционной профилометрии на основе массива вихревых оптических пучков.....	437
ДЕНИСОВ Д.Г. Анализ численного решения уравнения съёма оптического материала при формообразовании плоской поверхности крупногабаритной оптической детали.....	439
МАКСИМОВА Л.А., ПАТРУШЕВ Б.А., МЫСИНА Н.Ю., РЯБУХО В.П. Лазерный спекл-интерферометр поперечных микроперемещений рассеивающего объекта: численное моделирование и натурный эксперимент.....	441

АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М. Двухэкспозиционная голографическая интерферометрия динамических периодических структур.....	443
ИСМАНОВ Ю.Х., ТЫНЫШОВА Т.Д. Улучшение характеристик интерферограмм, получаемых на выходе голографического интерферометра.....	445
БУТЬ А.И., ЛЯЛИКОВ А.М. Голографическая интерферометрия реверсивного сдвига при измерительном контроле клиновидных пластин.....	447
КОСТЕНИКОВ М.А., ЛЕВАНИСОВ В.А., КОЧЕТОВА В.В., ШМАКОВ С.С. Программная реализация нейронной сети для обработки экспериментальных данных в оптике.....	449
ДЕНИСОВ Д.Г., БАРМА Д.Д., МАЛАХОВ К.М. Современные решения атомно-силовой микроскопии в задачах аттестации перспективных технологических изделий.....	451
БОГАЧКОВ И.В., ХОМЧЕНКО А.В., ЧУРСИН Н.А. Разработка виртуальной лабораторной работы для изучения дифракции света с помощью зон Френеля.....	453
БАРМА Д.Д., ДЕНИСОВ Д.Г., ГЕЙВАНДОВ А.Р. Разработка фазовых дифракционных решёток на основе жидких кристаллов.....	455
ГАНЖЕРЛИ Н.М., ГУЛЯЕВ С.Н., МАУРЕР И.А. Новые методы получения высокочастотных голографических решёток на бихромированном желатине при использовании коротковолнового УФ-излучения.....	457
ПЕН Е.Ф. Эффективная энергия голографической записи с учётом темновой полимеризации.....	459
ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ИСМАНОВ Ю.Х., ЖУМАЛИЕВ К.М. Особенности скоростного восстановления латентных изображений, записанных на тонких фототермопластических плёнках.....	461
АВЛАСЕВИЧ Н.Т., ЛЯЛИКОВ А.М. Особенности формирования голограмм периодических структур при пространственно-когерентном освещении.....	463
ГАРНАЕВА Г.И., НЕФЕДЬЕВ Л.А., НИЗАМОВА Э.И. Логические операции в оптической эхо-голографии при воздействии внешними пространственно-неоднородными электрическими полями.....	465
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., ШИФРИНА А.В. Универсальный матричный контейнер цифровых данных для систем оптической обработки информации.....	467
ЕВТИХИЕВ Н.Н., КРАСНОВ В.В., РЯБЦЕВ И.П., ШИФРИНА А.В. Оптическое кодирование новых универсальных матричных контейнеров цифровых данных в безлинзовой схеме с пространственно-некогерентным освещением.....	469

ЦИПЛАКОВА Е.Г., КУЛЯ М.С., ГОРОДЕЦКИЙ А.А., СОКОЛЕНКО Б.В., ПЕТРОВ Н.В. Оптимизация соотношения сигнал-шум в задаче кодирования с использованием сверхширокополосных пучков с однородным топологическим зарядом.....	471
НИКИТЕНКО В.И., ВЕТОХИН С.С., САЕЧНИКОВ В.А., СВИРИДОВ А.А. ПОК-алгоритмы обнаружения слабых оптических сигналов в неопределённых условиях положительного или отрицательного контрастов.....	473
ИСМАНОВ Ю.Х., ДЖАМАНКЫЗОВ Н.К., ЖУМАЛИЕВ К.М., АЛЫМКУЛОВ С.А. Влияние конечности периодических объектов на качество восстановления саморепродукций.....	475
КОЗЛОВ А.В., ЧЕРЁМХИН П.А. Повышение качества реконструкции 3D-объектов с голограмм на основе цифровой фильтрации интерполированного восстановленного поля.....	477
РЫМОВ Д.А., СТАРИКОВ Р.С., ЧЕРЁМХИН П.А. Восстановление изображений с голограмм 3D-сцен на основе машинного обучения.....	479
ПАВЛОВ П.В., НЕРУШ М.Н., ХОБТА Р.Г. Применение итерационного восстановления изображений дефектов остекления кабин самолётов методом компьютерной голографии.....	481
ВИШНЯКОВ Г.Н., МИНАЕВ В.Л., ИВАНОВ А.Д. Использование квадролинзы для сдвиговой спекл-интерферометрии.....	483
КАЙТУКОВ Ч.Б., КИСЕЛЕВ В.А., ЯНОВСКИЙ А.В. Создание голограмм с визуальными эффектами полноцветного и объёмного изображений.....	484
КУРБАТОВА Е.А., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А. Адаптивный подбор весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации цифровых голограмм.....	485
КРАСНОВ В.В., МОЛОДЦОВ Д.Ю., РОДИН В.Г., ЧЕРЁМХИН П.А., СТАРИКОВ Р.С. Сравнительный анализ бинарных амплитудных голограмм, синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли.....	487
Именной указатель авторов.....	489

И.Р. ГАБИТОВ^{1,2}, Д. ГИБНИ¹, И.А. КУК²

¹Университет Аризоны, Тусон, США

²Сколковский институт науки и технологий, Московская обл.

ОПТИЧЕСКАЯ КОММУНИКАЦИЯ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКРЫТИЯ ДИСПЕРСИОННО УШИРЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ И ВНУТРИКАНАЛЬНОГО ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Рассмотрена возможность использования принципов когерентной оптоволоконной коммуникации в условиях выраженной нелинейности оптического волокна. Исследованы случаи слабой и сильной нелинейности. В случае слабой нелинейности изучено внутриканальное взаимодействие оптических импульсов и его влияние на результат декодирования. Исследованы статистические характеристики искажений в зависимости от структуры битовой последовательности. В случае сильной нелинейности на основе свойства интегрируемости модельного уравнения проанализирована возможность использования линейного характера эволюции данных рассеяния спектра оператора Лакса для передачи данных в когерентных системах.

I.R. GABITOV^{1,2}, J. GIBNEY¹, I.A. KUK²

¹University of Arizona, Tucson, USA

²Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow region

OPTICAL COMMUNICATIONS IN PRESENCE OF DISPERSIVE BROADENED PULSE OVERLAPPING AND FOUR WAVE MIXING

The feasibility of extending principles of coherent optical fiber communication to nonlinear systems is considered. In the case of weak nonlinearity, the intrachannel interaction of optical pulses and its influence on the decoding result are studied. The statistical characteristics of distortions depending on the structure of the bit sequence are investigated. The integrability of the modeling equation results in a linear evolution of the scattering data of the Lax operator. In the case of strong nonlinearity, rather than using the original optical pulse sequence, the possibility of utilizing this scattering data for information transmission in coherent systems is analyzed.

Основой современной высокоскоростной передачи информации являются оптоволоконные когерентные системы [1]. Упрощённая схема когерентной линии связи приведена на рис. 1. Непрерывное лазерное излучение преобразуется модулятором в последовательность импульсов с

дифференциально фазовой модуляцией. Декодирование в общем случае осуществляется путём сравнения фаз соседних импульсов либо сравнением фазы импульса с фазой непрерывного излучения лазерного осциллятора (см. рис. 1).

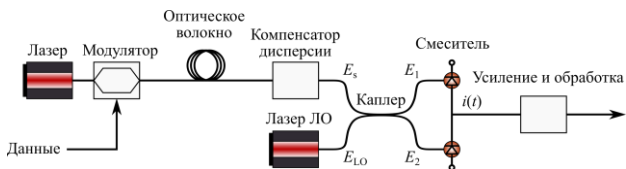


Рис. 1. Упрощённая схема когерентной линии связи.

Дисперсионное уширение компенсируется в конце оптоволоконной линии, и далее сигнал E_S смешивается с непрерывным излучением лазерного осциллятора E_{LO} . В результате оптический сигнал E_S преобразуется в электрический

$$i(t) \sim \sqrt{P_S P_{LO}} \cos[(\omega_S - \omega_{LO})t + \varphi_S(t) - \varphi_{LO}(t)],$$

здесь P_S , P_{LO} – мощности сигнала и лазерного излучения, $\varphi_S(t)$, $\varphi_{LO}(t)$ – фазовый шум сигнала и лазера. Существенным ограничением таких линий является линейный режим работы. Увеличение расстояния или скорости передачи данных сопровождается возрастанием нелинейных эффектов оптического волокна. Нелинейные эффекты в последовательности импульсов, перекрывающихся в результате дисперсионного уширения, включают в себя перекрестную и самомодуляцию фазы, а также четырёхволновое взаимодействие [2]. Результатом является изменение разности фаз соседних импульсов, кодирующих информацию, а также перераспределение энергии в потоке импульсов, что приводит к ошибкам декодирования.

Нами рассмотрен подход, позволяющий использовать принципы когерентной передачи в условиях нелинейности оптического волокна. Подход основан на свойстве интегрируемости нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), с высокой точностью описывающего распространения оптических импульсов в волокне. Коэффициент отражения задачи рассеяния для ассоциированного оператора Лакса, потенциалом которого является решение НУШ, эволюционирует “вдоль волокна” по линейному закону [3]. На основе этого вместо выходного оптического сигнала предлагается производить обработку ассоциированного “сигнала”, представляющего собой коэффициент

отражения задачи рассеяния. Коэффициент отражения определяется путем решения прямой задачи рассеяния с использованием в качестве рассеивающего потенциала оптическое поле на выходе волокна. После процедуры “компенсации дисперсии” коэффициент отражения соответствует исходной последовательности. Для восстановления исходной последовательности импульсов по коэффициенту отражения предлагается использовать метод задачи Римана-Гильберта [3]. Пример восстановления единичного импульса приведён на рис. 2.

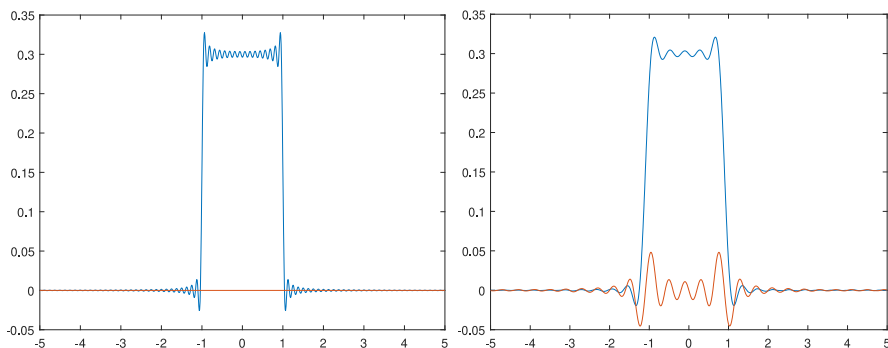


Рис. 2. Прямоугольный импульс, восстановленный после прохождения пяти характерных длин нелинейности (слева направо), синим и красным цветом помечены реальная и мнимая компоненты комплексной амплитуды импульса

В случае слабой нелинейности проведён численно-аналитический анализ формирования нелинейных искажений последовательности импульсов, исследованы статистические характеристики искажений и их влияние на результат декодирования. В частности, показано, что искажения произвольного импульса формируются резонансными тройками окружающих импульсов, в свою очередь, резонансные тройки группируются в соответствие с их вкладом в нелинейные искажения. Найдены аналитические выражения, определяющие положение резонансных троек и их объединение в группы.

Список литературы

1. Kikuchi K. Fundamentals of coherent optical fiber communications // J. Light. Technol. 2016. V. 34. P. 157-179.
2. Mamyshev P.V., Mamysheva N.A. // Optics Letters. 1999. V. 24(21). P. 1454-1456.
3. Захаров В.Е., Шабат А.Б. Интегрирование нелинейных уравнений математической физики методом обратной задачи рассеяния. II // Функт. анализ и его прил. 1979. Т. 13(3). С. 13-22,

Д.А. ЗИМНЯКОВ^{1,2}, С.С. ВОЛЧКОВ¹, Л.А. КОЧКУРОВ¹¹*Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина*²*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВО ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИХ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

Лазерная накачка флуоресцирующих случайно-неоднородных сред приводит к известному явлению стохастической лазерной генерации. Показано, что спекл-модуляция излучения накачки в условиях отсутствия связи между низкодобротными микрорезонаторами, ассоциируемыми со спеклами, является фундаментальным фактором, ограничивающим качество стохастической лазерной эмиссии. Результаты моделирования кинетики пространственно-ограниченной стохастической лазерной генерации сопоставлены с экспериментальными данными для насыщенных родамином 6Ж слоёв наночастиц анатаза, накачиваемых второй гармоникой YAG:Nd лазера.

D.A. ZIMNYAKOV^{1,2}, S.S. VOLCHKOV¹, L.A. KOCHKUROV¹¹*Yury Gagarin State Technical University, Saratov*²*Institute for Problems of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

FUNDAMENTAL LIMITATIONS OF RANDOM LASING IN FLUORESCENT INHOMOGENEOUS MEDIA

Laser pumping of fluorescent inhomogeneous media in the fundamental absorption band of fluorophores causes the well-known phenomenon of random lasing. It is shown that speckle modulation of pump radiation in inhomogeneous media in the absence of coupling between low-finesse microcavities associated with speckles is a fundamental factor limiting the random lasing quality. The results of modeling the kinetics of confined random lasing are compared to experimental data for Rhodamine6G-saturated layers of anatase nanoparticles pumped by the second harmonics of a YAG:Nd laser.

Эффект стохастической лазерной генерации, впервые предсказанный В.С. Летоховым в 1967 г. [1], явился объектом интенсивных исследований в последние три десятилетия. Характерными особенностями безрезонаторных лазерных систем со случайной структурой, ограничивающими их практические применения, являются низкая эффективность преобразования накачки в генерируемое излучение и его невысокое качество, обусловленное низкой временной и

пространственной когерентностью. Вместе с тем, данное явление и в настоящее время продолжает представлять интерес с точки зрения диагностических приложений, в том числе и в биомедицине [2, 3].

Вплоть до настоящего времени в анализе стохастической лазерной генерации в случайно-неоднородных средах не учитывался эффект гранулярной структуры (спекл-модуляции) накачивающего излучения. Пространственно-временные распределения локальных значений плотности потоков энергии накачивающего и генерируемого световых полей обычно рассматривались в рамках диффузионного приближения теории переноса излучения, исключающего возможность учёта стохастической интерференции парциальных составляющих многократно рассеянного излучения [4, 5]. Вместе с тем, анализ взаимосвязи таких параметров стохастической лазерной генерации, как фактор спектрального качества $Q_\lambda = \bar{\lambda}/\Delta\lambda$ и фактор Парселла F_p [6] для различных случайно-неоднородных систем позволяет сделать вывод о соответствии характерного размера микрорезонаторов при стохастической лазерной генерации характерному размеру областей когерентности накачивающего поля в среде.

Таким образом, накачиваемая среда может рассматриваться как ансамбль статистически независимых низкодобротных микрорезонаторов с характерным размером порядка длины волны накачки. Спектральное качество индуцированного флуоресцентного излучения для подобных систем существенно ограничено обеднением основного состояния флуоресцирующих центров и радиационными потерями. Результаты моделирования соотношения между стимулированной и спонтанной составляющими стохастической лазерной эмиссии для ансамбля статистически независимых низкодобротных микрорезонаторов, полученные в рамках данного подхода, согласуются с эмпирическими данными о спектрально-энергетических характеристиках флуоресценции для насыщенных родамином бЖ слоёв наночастиц анатаза, накачиваемых ниже и выше порога стохастической лазерной генерации.

Список литературы

1. Letokhov V.S. // Soviet Physics JETP. 1968. V. 26 (4). P. 835-840.
2. Song Q.H., Xiao S.M., Xu Z.B., et al. // Optics Letters. 2010. V. 35 (9). P. 1425-1427.
3. Zhang R., Knitter S., Liew S.F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108 (1). P. 011103.
4. van Soest G., Legendijk A. // Phys. Rev. E. 2002. V. 65 (4). P. 047601.
5. García-Revilla S., Fernández J., Illarramendi M.A., et al. // Optics Express. 2008. V. 16 (16). P. 12251.
6. Purcell E.M. // Phys. Rev. 1946. V. 69 (11-12). P. 681.

Н.В. МИНАЕВ, В.С. ЖИГАРЬКОВ, В.И. ЮСУПОВ

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

ЛАЗЕРНАЯ ПЕЧАТЬ ГИДРОГЕЛЕВЫМИ КАПЛЯМИ С ЖИВЫМИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ МЕТОДОМ LIFT

Представляется обзорный доклад, посвящённый циклу работ по разработке, реализации и внедрению подхода ЛИМС – лазерной инженерии микробных систем и расширению сфер её применения. В основе подхода лежит реализация технологии лазерной печати гидрогелевыми каплями с живыми микроорганизмами методом прямого лазерноиндуцированного переноса – LIFT (Laser Induced Forward Transfer). Предлагаемый подход был реализован в нескольких экспериментальных лазерных системах, с помощью которых был проведён цикл работ по исследованию особенностей процесса лазерной печати и адаптации его под задачу пространственного переноса живых микробных объектов и содержащих их субстратов. Благодаря этому были получены новые результаты по выделению новых видов трудно культивируемых и некультивируемых микроорганизмов.

N. V. MINAEV, V. S. ZHIGARKOV, V. I. YUSUPOV

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

LASER PRINTING OF HYDROGEL DROPS WITH LIVING MICROBIOLOGICAL OBJECTS BY THE LIFT METHOD

An overview report will be presented, dedicated to the cycle of work on the development, implementation and implementation of the LIMS approach - laser engineering of microbial systems and the expansion of the scope of its application. The approach is based on the implementation of the technology of laser printing with hydrogel drops with living microorganisms by the method of direct laser-induced transfer – LIFT (Laser Induced Forward Transfer). The proposed approach was implemented in several experimental laser systems, with the help of which a series of works was carried out to study the features of the laser printing process and its adaptation to the task of spatial transfer of living microbial objects and substrates containing them. Thanks to this, new results were obtained on the isolation of new species of difficult-to-cultivate and non-cultivated microorganisms.

Лазерное излучение благодаря своим уникальным свойствам в настоящее время крайне широко используется в широком спектре

областей науки и техники. В последние годы, лазерная печать, основанная на переносе микроскопического количества вещества под действием импульсов давления при воздействии импульсного лазерного излучения, используется в тканевой инженерии при создании искусственных конструкций для восстановления повреждений ткани и органов [1]. Этот же механизм переноса лежит в основе подхода лазерной инженерии микробных систем, подхода, позволяющего выделять трудно культивируемые и некультивируемые стандартными способами микроорганизмы [2] и разделять "неразделимые" сообщества симбионтов [3]. Технология ЛИМС также востребована для синтеза новых антибиотиков, производства биологически активных веществ и редких микроорганизмов, востребованных в биотехнологии и фармацевтике, а также создания своеобразного всемирного банка – "Ноева ковчега" микроорганизмов [4].

Были разработаны и изготовлены экспериментальные установки лазерной печати, на которых был выполнен цикл работ по выделению трудно культивируемых микроорганизмов из ординарных (обычных) почв [5], разделению симбионтов [3], а также повышению видового разнообразия выделяемых микроорганизмов [6] и исследованию влияния наночастиц в среде культивации на видовое разнообразие микробов [7]. Были проведены исследования физических аспектов процесса лазерного переноса, включая оценки воздействий на переносимые живые объекты, а также разработаны алгоритмы подбора оптимальных режимов для процесса переноса гидрогелевых капель.

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 переноса гидрогелевых капель и гранта РФФ 20-14-00286 в части развития технологии ЛИМС. Работа Минаева Н.В. поддержана Стипендией Президента № СП-2728.2019.4.

Список литературы

1. Koch L., et al. // Tissue Eng. Part C Methods. 2010. V. 16. № 5. P. 847-854.
2. Yusupov V., et al. // Int. J. Bioprinting. 2020. V. 6. № 3. P. 1-16.
3. Kochetkova T.V., et al. // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2020. V. 70. № 2. P. 1192-1202.
4. Bello M.G.D., et al. // Science (80-.). 2018. V. 62, № 6410. P. 33-34.
5. Yusupov V.I., et al. // Laser Phys. Lett. 2018. V. 15. № 6. P. 065604.
6. Gorlenko M.V., et al. // J. Biol. Eng. Journal of Biological Engineering, 2018. V. 12. № 1. P. 27.
7. Cheptsov V.S., et al. // Lett. Appl. Microbiol. 2018. V. 67. № 6. P. 544-549.

А.А. ГОРОДЕЦКИЙ^{1,2}

¹Университет Бирмингема, Великобритания

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

КОМПАКТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РАБОТАЮЩИЕ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Рассмотрены наиболее перспективные подходы к генерации терагерцового излучения компактными полупроводниковыми источниками, работающими при комнатной температуре. Обзор рассматривает следующие подходы к генерации терагерцового излучения: 1) генераторы на фотогальваническом эффекте Дембера, 2) фотопроводящие антенны, 3) фотомиксеры, 4) генерация разностной частоты излучения квантово-каскадных лазеров, 5) спинтронные эмиттеры.

A.A. GORODETSKY^{1,2}

¹University of Birmingham, United Kingdom

²ITMO University, Saint-Petersburg

COMPACT ROOM-TEMPERATURE OPERATING TERAHERTZ TRANSCEIVERS

The most promising approaches to the generation of terahertz radiation by compact semiconductor sources operating at room temperature are considered. The review considers the following approaches to the generation of terahertz radiation: 1) generators based on the photovoltaic Dember effect, 2) photoconductive antennas, 3) photomixers, 4) generation of the difference frequency of radiation from quantum cascade lasers, 5) spintronic emitters.

Терагерцовая наука как отдельное направление в прошлом году отметила тридцатипятилетие. За прошедшие с пионерских экспериментов Д. Остона по генерации терагерцового (ТГц) излучения в полупроводнике и нелинейном кристалле [1, 2] годы так и не нашлось единого универсального ТГц источника, подходящего под большинство задач. Мы рассмотрим наиболее популярные из существующих компактных источников ТГц излучения, работающих при комнатной температуре. Под компактными мы понимаем источники размером до 0.5 x 0.5 x 0.5 метра, включая блоки питания и сопутствующие компоненты.

ТГц область электромагнитного спектра, по наиболее общепринятому определению занимает диапазон от 100 ГГц до 10 ТГц (30 - 3000 мкм, 0.4 - 40 мэВ, $3.33 - 333 \text{ см}^{-1}$) и находится между микроволновым и

инфракрасным излучением. Основными подходами к генерации ТГц излучения являются: 1) апконверсия микроволнового излучения, 2) генерация огибающей или разностной частоты оптической или инфракрасной накачки, 3) непосредственная генерация ТГц излучения в квантовокаскадных лазерах (ККЛ) и 4) генерация в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ). В результате апконверсии редко достигаются существенные мощности на частотах выше 0.7 ТГц, ККЛ требуют достаточно низких (246 К [3] и ниже) температур, ЛСЭ занимают целое здание. Таким образом, в поисках эффективного компактного источника ТГц излучения следует обратить внимание на подходы, использующие оптическую накачку. Для генерации импульсного ТГц излучения используются лазерные импульсы субпикосекундной длительности, а для генерации непрерывного – смешение лазерного излучения на двух близких длин волн, с разностью частот в ТГц диапазоне спектра.

Один из самых распространённых способов использует ускоренное движение электронов в полупроводнике с малыми временами жизни свободных носителей. При возбуждении фемтосекундными импульсами или излучением двух близких длин волн динамика концентрации свободных носителей под действием внешнего электрического или магнитного поля проявится в быстро меняющемся токе, и, следовательно, генерации электромагнитных волн ТГц диапазона спектра. Такие источники позволяют получать излучение мощностью до нескольких десятков мкВт в диапазоне 0.2 - 5 ТГц. Перспективен подход, использующий внутрирезонаторное смешение излучения инфракрасных ККЛ (9 - 10 мкм) в квантовых волноводах, обеспечивающих крайне высокую нелинейность [4]. Однако, сильное поглощение ТГц излучения в волноводах, особенно в низкочастотной области спектра, ограничивает их эффективность ниже 3 ТГц. В 2013 г. был продемонстрирован новый тип эффективных источников импульсного излучения на основе спинового токопереноса в сэндвичах, состоящих из слоёв ферромагнитных и неферромагнитных металлов толщиной в единицы нанометров [5]. Такие источники позволяют получить сигналы, сравнимые по величине с полупроводниковыми и превосходящие их по ширине спектра.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-07-01492 А.

Список литературы

1. Auston D.H., et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. P. 1555.
2. Auston D.H., et al. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 45. P. 284.
3. Khalatpour A., et al. // Nat. Photonics. 2021. V. 15. P. 16.
4. Belkin M.A., Capasso F. // Phys. Scr. 2015. V. 90. P. 118002.
5. Seifert T., et al. // Nat. Photonics. 2016. V. 10. P. 483.

О.С. КАБАНОВА, И.И. РУШНОВА, Е.А. МЕЛЬНИКОВА,
А.Л. ТОЛСТИК

Белорусский государственный университет, Минск

УПРАВЛЕНИЕ СВЕТОВЫМИ ПУЧКАМИ ПЛАНАРНЫМИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Установлены закономерности планарного распространения световых пучков в тонкоплёночных жидкокристаллических (ЖК) элементах с двухдоменной и многодоменной ориентацией директора. Предложен метод пространственно-углового управления лазерным излучением на основе электрически контролируемого смещения рефрактивной границы в плоскости нематического ЖК-слоя. Изготовлены экспериментальные макеты ЖК-элементов интегральной фотоники, реализующие пространственно-поляризационное разделение, переключение направлений распространения, смещение, угловое отклонение, волноводное распространение, а также разветвление и мультиплексирование световых сигналов видимой области спектра.

O.S. KABANOVA, I.I. RUSHNOVA, E.A. MELNIKOVA,
A.L. TOLSTIK

Belarusian State University, Minsk

CONTROL OF LIGHT BEAMS BY PLANAR LIQUID CRYSTAL ELEMENTS

New regularities of beam propagation in planar-type liquid crystal (LC) elements characterized by dual- and multi-domain nematics alignment were established. A new method of in-plane angular beam steering based on an electrically controlled spatial displacement of the LC refractive index interface is proposed. Prototypes of LC integrated photonics elements implementing spatial-polarization separation, switching, microscanning, angular deviation, waveguide propagation, as well as splitting and multiplexing of light beams were fabricated and examined for in-plane beam steering applications.

ЖК-элементы планарного типа демонстрируют отличные возможности для пространственно-поляризационного управления оптическим излучением, что обуславливает их высокую востребованность в области разработки и создания новейших устройств интегральной фотоники [1, 2]. Особый интерес исследователей и инженеров во всём мире привлекают локально-неоднородные планарные ЖК-структуры, принцип функционирования которых основан на эффекте полного внутреннего

отражения (ПВО) от рефрактивной границы раздела ЖК-доменов с ортогональными ориентациями директора [3-6].

В работе выполнены комплексные исследования по проектированию, оптимизации технологий изготовления и изучению оптических свойств планарных ЖК-элементов с двухдоменной и многодоменной ориентацией директора. Для формирования рефрактивной границы в объёме планарно-ориентированного ЖК-слоя использовались подложки с узорчатыми электродами различной конфигурации. Разработана новая схема переключений направлений распространения ортогональных поляризационных мод с использованием электрически управляемой рефрактивной границы в нематическом жидком кристалле. Предложен новый метод полностью оптического управления лазерным излучением на основе обнаруженного явления пространственного смещения рефрактивной границы в плоскости ЖК-слоя под действием краевого электрического поля, что позволило реализовать микросканирование световым пучком с широким диапазоном 0...200 мкм. С помощью изготовленного ЖК-переключателя с рефрактивной границей в форме дуги экспериментально продемонстрировано угловое управление отражённой световой волной с разрешением порядка единиц миллирадиан. Достигнуто значительное смещение светового луча под действием краевого электрического поля (порядка 7 мкм/В), что позволит изготавливать ЖК-переключатели с большим числом выходных портов по сравнению с существующими аналогами.

Установлено, что многодоменная твист-планарная ориентация директора обеспечивает формирование поляризационно-чувствительных волноводных каналов в тонкоплёночном ЖК-слое. Предложены новые конфигурации пространственно-модулированного электрического поля, индуцирующие в планарно-ориентированном ЖК-слое волноводные разветвители и сумматоры световых пучков. Изготовлены и апробированы экспериментальные макеты электрически переключаемых волноводных ЖК-элементов, реализующих управляемые функции передачи, разветвления и мультиплексирования линейно-поляризованных световых пучков видимой области спектра.

Список литературы

1. Zografopoulos D.C., Asquini R., et al. // Lab Chip. 2012. V. 12. P. 3598-3610.
2. Davis S.R., Farca S.D., et al. // Proc. SPIE. 7618. 2010. P. 76180E.
3. Barboza R., Alberucc A., Assanto G. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2012. V. 558. P. 12-21.
4. Melnikova E.A., Tolstik A.L., et al. // Appl. Opt. 2016. V. 55. P. 6491-6495.
5. Rushnova I.I., Melnikova E.A., et al. // Opt. Commun. 2018. V. 413. P. 179-183.
6. Rushnova I.I., Melnikova E.A., et al. // Appl. Opt. 2020. V. 59. P. 10695-10699.

Е.П. ПОЖИДАЕВ, Т.П. ТКАЧЕНКО, А.В. КУЗНЕЦОВ,
И.Н. КОМПАНЕЦ

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

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ГЛАВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ СПИРАЛЬНОЙ НАНОСТРУКТУРЫ В СЖК-ДИСПЛЕЙНОЙ ЯЧЕЙКЕ

Экспериментальные результаты и расчёты, основанные на классической электрооптике кристаллов, свидетельствуют, что электрооптическое переключение в режиме IPS является естественной и неотъемлемой особенностью обычной дисплейной ячейки, проявляющей DHF-эффект в планарно-ориентированном слое сегнетоэлектрического жидкого кристалла (СЖК). Найденны условия и при них реализован режим IPS переключения с частотой 1 кГц.

E.P. POZHIDAEV, T.P. TKACHENKO, A.V. KUZNETSOV,
I.N. KOMPANETS

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

ELECTRO-OPTICAL SWITCHING OF THE MAIN OPTICAL AXIS OF A HELIX NANOSTRUCTURE IN FLC DISPLAY CELL

Experimental results and calculations based on classical electro-optics of crystals indicate that electro-optical switching in the IPS mode is a natural and intrinsic feature of a conventional display cell exhibiting DHF effect in a planar-oriented FLC layer. Conditions were found due to which IPS mode was realized with frequency of 1 kHz.

Основными достоинствами переключения главной оси нематического жидкого кристалла (НЖК) в плоскости, параллельной подложкам дисплейной ячейки, известного как «In-Plane Switching» (IPS), являются большой угол обзора (более 170 градусов) и улучшенная цветопередача [1]. Вместе с тем производство IPS-дисплеев на основе НЖК является технологически сложным вследствие необходимости изготовления решётки встречно-штыревых электродов.

В геликоидальных сегнетоэлектрических жидких кристаллах (СЖК) наблюдается электрооптический эффект деформированной электрическим полем спиральной наноструктуры СЖК (СНСЖК), известный как DHF-эффект [2]. В планарно ориентированной DHF СНСЖК-ячейке со сплошными электродами вектор электрического поля направлен перпендикулярно подложкам, а главная оптическая ось параллельна им и

отклоняется в плоскости, параллельной подложкам [3]. Это является предпосылкой реализации IPS в такой ячейке.

Экспериментальная проверка возможности реализации IPS осуществлялась для ячейки с СЖК FLC-650, имеющим угол наклона молекул $\theta = 38.4^\circ$ при 22°C и шаг спирали $p_0 < 100$ нм, удовлетворяющий требованию $p_0 \leq \lambda/5$ [4]. Другим условием, обоснованным теоретически и экспериментально [5, 6], является измеряемое значение светопропускания ячейки, расположенной между скрещёнными поляроидами:

$$T(E) = \sin^2 4\Psi_d(E) \cdot \sin^2 \frac{\pi \Delta n_{\text{eff}}(E)d}{\lambda},$$

где $\Delta n_{\text{eff}}(E) = n_+(E) - n_-(E)$ – эффективное двулучепреломление слоя DHF СНСЖК в электрическом поле E , причём $n_+ \sim E^2$, $n_- \sim E^2$, и $\Psi_d \sim E$ – угол отклонения главной оптической оси в плоскости подложек.

Показанная на рис. 1 экспериментальная зависимость $T(E)$ практически совпадает с расчётной зависимостью $\sin^2(4\Psi_d)$, а коэффициент $\sin^2(\pi \Delta n_{\text{eff}} d / \lambda)$, обозначенный как $\sin^2(\text{Phase})$, практически не меняется, когда $0 \leq T(E) \leq 1$. Следовательно, электрооптическая модуляция света вызвана, главным образом, переключением главной оптической оси в параллельной подложкам плоскости.

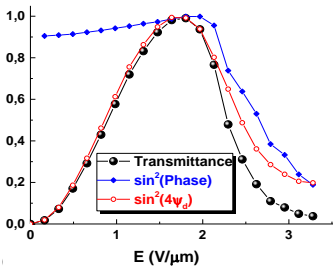


Рис. 1. Измеренное пропускание света $T(E)$ (чёрные шары) и вычисленные значения компонентов $T(E)$ для DHF СНСЖК-ячейки с FLC-650 при $d = 3,05$ мкм

Кроме отсутствия встречно-штыревых электродов, IPS СЖК дисплейная ячейка по отношению к IPS НЖК показывает в несколько раз большую частоту электрооптической модуляции – порядка 1 кГц [6].

Список литературы

1. Oh-E M., Kondo K. // Liq. Cryst. 1997. V. 22. P. 379.
2. Beresnev L.A., et al. // Liq. Cryst. 1989. V. 5. P. 1171.
3. Pozhidaev E.P., et al. // Optics Letters. 2014. V. 39. P. 2900.
4. Hubert P., et al. // Phys. Rev. E. 1998. V. 58. P. 3264.
5. Kiselev A.D., et al. // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 031703.
6. Pozhidaev E.P., et al. // Crystals. 2019. V. 9(10). P. 543.

В.Я. ШУР, А.Р. АХМАТХАНОВ, А.А. ЕСИН, М.А. ЧУВАКОВА,
Д.Б. КОЛКЕР¹, А.А. БОЙКО¹, В.С. ПАВЕЛЬЕВ²,
Г.С. СОКОЛОВСКИЙ³

Уральский федеральный университет, Екатеринбург

¹Новосибирский государственный университет

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

³Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛАХ И ТОНКИХ ПЛЁНКАХ С РЕГУЛЯРНОЙ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Приведены последние достижения и перспективы использования методов доменной инженерии для создания регулярных доменных структур в монокристаллах сегнетоэлектриков семейств ниобата лития (LN и LT) и титанил-фосфата калия (КТР и КТА), и в тонких плёнках LN для генерации второй гармоники и параметрической генерации света. На основе LN созданы макеты дифракционно-оптических элементов для управления когерентным излучением.

V.Ya. SHUR, A.R. AKHMATKHANOV, A.A. ESIN,
M.A. CHUVAKOVA, D.B. KOLKER¹, A.A. BOYKO¹,
V.S. PAVELYEV², G.S. SOKOLOVSKIИ³

Ural Federal University, Ekaterinburg

¹Novosibirsk State University

²Samara National Research University

³Ioffe Institute of the RAS, Saint-Petersburg

NONLINEAR OPTICAL CONVERSIONS IN FERROELECTRIC CRYSTALS AND THIN FILMS WITH PERIODICAL DOMAIN STRUCTURES

We will present the recent achievements and perspectives in application of the domain engineering methods for creation of the periodical stable domain structures in single crystals of lithium niobate (LN and LT), and potassium titanyl phosphate (КТР and КТА) families and LN thin films for realization of the second harmonic generation and optical parametric oscillation. The produced experimental samples of LN based diffraction optical elements for control of coherent light results will be discussed.

Выполнение условий фазового квазисинхронизма в нелинейно-оптических кристаллах за счёт создания регулярных сегнетоэлектрических доменных структур (РДС) с нанометровой воспроизводимостью периода позволило реализовать генерацию второй гармоники (ГВГ) и параметрическую генерацию света (ПГС) вне резонатора с рекордной эффективностью.

Выявленные закономерности кинетики доменной структуры при повышенных температурах позволили оптимизировать методы создания РДС в легированных Mg кристаллах LN (MgO:LN) и LT (MgO:LT) и реализовать ГВГ преобразование с выходной мощностью более 15 Вт.

Веерные доменные структуры, созданные в кристаллах MgO:LN, позволили реализовать ПГС с перестройкой холостой волны от 2,5 до 4,5 мкм при накачке лазером 1053 нм. Обсуждается возможность изготовления элементов толщиной до 10 мм для реализации ПГС высокой мощности.

В кристаллах КТР создана РДС для реализации ПГС с холостой волной 2,4 мкм. Рассматриваются возможности и перспективы создания РДС с субмикронным периодом. Исследована возможность создания веерных доменных структур в кристаллах КТР. Показано, что максимальный угол отклонения стенок полосовых доменов от кристаллографического направления, при котором не искажается доменная структура, составляет около двух градусов. В кристаллах КТА создана многопериодная доменная структура для генерации ПГС в области 2,4 мкм.

В кристаллах MgOLN с РДС методом прецизионной резки изготовлены гребенчатые волноводы. Аномально высокий контраст показателя преломления в полученных многомодовых волноводах позволил реализовать ГВГ с перестройкой длины волны от 510 до 570 нм при длине волны накачки 1064 нм.

Исследованы особенности формирования доменной структуры в тонких монокристаллических плёнках LN субмикронной толщины, полученных методом ионного скола на изоляторе (LNOI). Созданы регулярные нанодоменные полосовые структуры с периодом до 200 нм.

Различный знак электрооптических коэффициентов в доменах с различным направлением спонтанной поляризации позволяет создавать перестраиваемые дефлекторы, диффузоры зонные пластинки и детекторы Шака-Гартмана, управляемые электрическим полем. Изготовлен макет дифракционного оптического элемента для скоростной модуляции поперечно-модового состава светового пучка, позволяющий преобразовывать моды Гаусса-Эрмита (1,0) (или (0,1)) из гауссова пучка.

Т.А. ХУДАЙБЕРГАНОВ, Д.Н. БУХАРОВ, А.О. КУЧЕРИК,
С.М. АРАКЕЛЯН

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

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ ЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДХОДОВ КВАНТОВОЙ
НАНОФОТОНИКИ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Исследованы фундаментальные размерные явления топологической квантовой нанофотоники в лазерно-индуцированных поверхностных твердотельных структурах и перспективы использования этих эффектов в различных приложениях для элементов квантовых вычислительных систем, разработанных на новых физических принципах.

T.A. KHUDAYBERGANOV, D.N. BUKHAROV, A.O. KUCHERIK,
S.M. ARAKELIAN

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs

**DEVELOPMENT OF ELEMENTS OF LOGICAL SYSTEMS
ON NEW PHYSICAL PRINCIPLES BY USING
THE APPROACHES OF QUANTUM NANOPHOTONICS
OF LOW-DIMENSIONAL TOPOLOGICAL STRUCTURES**

The fundamental dimensional phenomena of topological quantum nanophotonics in the laser-induced surface solid-state structures and the prospects for using these effects in various applications for elements of quantum computing systems developed on new physical principles are studied.

В едином комплексе приводятся результаты исследований, во-первых, по разработке динамических моделей развития и реализации в лазерном эксперименте топологических поверхностных наноструктур разного химического состава при управляемом их синтезе в наноструктурированных образцах с заданными функциональными характеристикам (оптика + электрофизика), и, во-вторых, – по развитию нелинейных и квантовых процессов в низкоразмерных структурах, в том числе в микрорезонаторных системах и одномерных проводках, при возбуждении в среде квантовых коллективных состояний с участием

экситон-поляритонов. Обсуждаются возможные схемы создания практических устройств на их основе с использованием алгоритмов и процедур численного моделирования и компьютерной симуляции, а также реализация специальных схем лазерных экспериментов.

Разработаны подходы и определены условия для использования лазерных методов, позволяющих получать в эксперименте нанокластерные системы из разных материалов – полупроводниковых, металлических и гибридных (металлоуглеродных и металлокремниевых – с благородными металлами – соединений) с управляемой топологией на твердотельной поверхности (с размерами гранул для металлических частиц – порядка 5 - 20 нм, для кремниевых – 100 - 200 нм).

Выявлены условия реализации различных механизмов квантовой электропроводимости с локализованными и делокализованными квантовыми состояниями электронов в нанокластерных системах (туннелирование и прыжковые процессы между разными кластерами в условиях термоактивации) и измерены зависимости электрофизических параметров таких объектов от их топологических особенностей, управляемо возникающих в лазерном эксперименте с учётом соответствующих граничных условий и неоднородностей поверхности.

Предложены режимы управления в модели квантового поляритонного логического элемента, работающего в квазиadiaбатическом бистабильном режиме с помощью как классических, так и квантовых внешних сигналов/шумов для различных приложений, например, в квантовых и классических устройствах триггерного типа для фотоники и квантовой электроники, а также в элементах для задач квантовой информатики и квантовой криптографии. Выполнен расчёт эффекта тепловой самолокализации поляритонного конденсата при нагреве лазерной накачкой решётки с квантовой ямой (упругая деформация решётки с электронами) в микрорезонаторе / микропроводе с формированием такого локализованного устойчивого конденсата.

Решение всех этих задач в едином комплексе должно позволить сформулировать новые физические принципы создания и контроля работы элементов современных устройств фотоники и оптоэлектроники, а также вычислительных систем нового поколения с использованием твердотельных тонкоплёночных микро- и наносистем с учётом последних достижений квантовых технологий и нелинейной динамики.

И.О. КИНЯЕВСКИЙ, В.И. КОВАЛЕВ, П.А. ДАНИЛОВ,
Н.А. СМИРНОВ, С.И. КУДРЯШОВ, А.В. КОРИБУТ,
Е.Е. ДУНАЕВА¹, А.А. ИОНИН

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

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

ОСОБЕННОСТИ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В КРИСТАЛЛЕ BaWO₄

Обнаружено, что по мере роста энергии 515-нм 300-фс лазерного импульса в спектре излучения, прошедшего через ВКР-активный кристалл BaWO₄, последовательно возникают, нарастают до максимума и затухают интенсивные спектральные пики с нарастающим Стоксовым сдвигом. Положение пиков коррелирует с частотами как основных мод в спектре спонтанного комбинационного рассеяния BaWO₄, так и с их линейными комбинациями. Активация этих пиков происходила при энергии импульсов, при которой спектральное уширение излучения накачки за счёт фазовой самомодуляции достигало соответствующего Стоксова сдвига.

I.O. KINYAEVSKIY, V.I. KOVALEV, P.A. DANILOV,
N.A. SMIRNOV, S.I. KUDRYASHOV, A.V. KORIBUT,
E.E. DUNAeva¹, A.A. IONIN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

STIMULATED RAMAN SCATTERING PARTICULARITIES OF FEMTOSECOND LASER PULSES IN BaWO₄ CRYSTAL

It was found that when energy of 515-nm 300-fs laser pulse transmitted through the Raman-active crystal BaWO₄ increases, intense spectral peaks with an increasing Stokes shift sequentially appear, increase to a maximum, and decay. The positions of the peaks correlate, along with the frequencies of the fundamental modes appearing in the spontaneous Raman scattering spectrum of BaWO₄, also with their linear combinations. These peaks are activated at a pulse energy at which the spectral broadening of the pump radiation due to self-phase modulation reaches the corresponding Stokes shift.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) света – это обширная область нелинейной оптики с множеством применений. В настоящее время одним из лучших по эффективности материалов для ВКР

преобразования является кристалл BaWO_4 . Ранее нами впервые было экспериментально продемонстрировано, что для 300-фс 515-нм лазерных импульсов, нестационарное ВКР с частотой смещения $\nu_1 = 925 \text{ см}^{-1}$ (самая сильная линия) в кристалле BaWO_4 может достигать высокой эффективности ($\sim 20\%$) в простой однопроходной схеме [1].

В текущей работе в условиях близких к [1] обнаружен также и ряд других, более низкочастотных, спектральных пиков. По мере роста энергии падающего лазерного импульса в спектре излучения, прошедшего через кристалл BaWO_4 , последовательно возникали, нарастали до максимума и затухали интенсивные спектральные пики с нарастающим Стоксовым сдвигом. Положение пиков коррелировало с частотами как основных мод в спектре спонтанного комбинационного рассеяния BaWO_4 [2], так и с их линейными комбинациями. Активация этих пиков происходила при энергии импульсов, при которой спектральное уширение излучения накачки за счёт фазовой самомодуляции достигало соответствующего Стоксова сдвига. Например, при энергии импульса 0.19 мкДж в спектре (рис. 1) наблюдались пики, соответствующие ВКР на моде $\nu_2 \approx 300 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 523 \text{ нм}$), и на линейной комбинации двух мод, $\nu_2 + T \approx 400 \text{ см}^{-1}$ ($\lambda = 526 \text{ нм}$). Эффективность преобразования накачки в эти Стоксовы компоненты составляла 35% и 30% , соответственно. Измеренные частотные сдвиги оказались слегка ниже, чем собственные частоты соответствующих колебательных мод BaWO_4 [2]. Природа таких особенностей обсуждается.

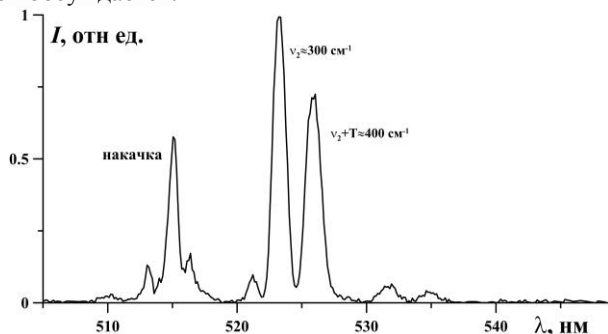


Рис. 1. Спектр лазерного импульса, преобразованного в кристалле BaWO_4

Список литературы

1. Kinyaevskiy I.O., Kovalev V.I., et al. // *Optic Letters*. 2020. V. 45. P. 2160-2163.
2. Suda J., Zverev P. // *Vibrational Spectroscopy*. 2012. V. 62. P. 85.

Р.А. ТИТОВ, В.М. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, Н.А. ТЕПЛЯКОВА,
Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ

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

ВЛИЯНИЕ ФЛЮСА B_2O_3 НА ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СТЕХИОМЕТРИЮ КРИСТАЛЛОВ $LiNbO_3:B$ (0.55, 0.69, 0.83 МОЛ. % B_2O_3)

Установлено, что следовое количество катионов бора ($4 \cdot 10^{-4}$ мол. %) размещается в структуре кристалла $LiNbO_3:B$ в составе группы $[BO_3]^{3-}$ и способствует снижению концентрации структурных дефектов Nb_{Li} .

R.A. TITOV, V.M. VOSKRESENSKIY, N.A. TEPLYAKOVA,
N.V. SIDOROV, M.N. PALATNIKOV

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

INFLUENCE OF B_2O_3 FLUX ON STRUCTURE PARTICULARITIES AND STOICHIOMETRY OF $LiNbO_3:B$ CRYSTALS (0.55, 0.69, 0.83 MOL. % B_2O_3)

It was found that a trace amount of boron cations ($4 \cdot 10^{-4}$ mol. %) are able to incorporate into the structure of $LiNbO_3:B$ ($[BO_3]^{3-}$ group). It leads to a decrease in the concentration of structural defects of Nb_{Li} in the crystal.

Нелинейно-оптический кристалл ниобата лития ($LiNbO_3$) является востребованным функциональным материалом электронной техники, что обусловлено успехами в оптимизации состояния его вторичной структуры и значимых физических характеристик. Для практического применения актуальны монокристаллы стехиометрического ($R = Li/Nb = 1$) и близкого к нему составов ($0.946 < R < 1$). Кристаллы стехиометрического состава выращивают из шихты с существенным избытком лития (до 58.6 мол. % $Li_2O - LiNbO_{3\text{стех}}$) и методом HTTSSG (High temperature top speed solution growth) из шихты конгруэнтного состава ($R = 0.946$) с добавлением флюса K_2O ($LiNbO_3:K_2O$). Кристаллы $LiNbO_{3\text{стех}}$ отличаются высокой неоднородностью состава вдоль оси роста, а кристаллы $LiNbO_3:K_2O$ содержат до 0.01 - 0.02 вес. % механически захваченной в процессе роста составляющей флюса, сконцентрированной на дефектах кристалла. Активно развиваемая нами новая технология, заключающаяся в

использовании флюса V_2O_3 при выращивании кристаллов из расплава конгруэнтного состава позволяет получать кристаллы $LiNbO_3:B$ ($0.946 < R < 1$), обладающие наиболее упорядоченной катионной подрешёткой по сравнению с $LiNbO_{3\text{конг}}$. Такие кристаллы обладают меньшим эффектом фоторефракции, по сравнению с кристаллом ($LiNbO_{3\text{стех}}$), и отличаются от кристаллов $LiNbO_3:K_2O$ следовым количеством составляющей флюса в структуре кристалла ($4 \cdot 10^{-4}$ мол. %).

Исследованные в работе кристаллы $LiNbO_3:B$ (0.55 - 0.83 мол. % V_2O_3 в шихте) выращены методом Чохральского на установке «Кристалл-2» с применением технологии прямого легирования [1].

Согласно особенностям электронного строения элемента бора и результатам компьютерного моделирования установлено, что катионы бора в следовых количествах локализуются в гранях вакантных тетраэдрических пустот кислородно-октаэдрической структуры кристалла ниобата лития в составе групп $[VO_3]^{3-}$, предотвращая образование дефектов Nb_{Li} по причине избыточного положительного заряда в рассматриваемом фрагменте структуры кристалла. Согласно эмпирическим данным, группа $[VO_3]^{3-}$ может образоваться в гранях тетраэдрических пустот, граничащих с литиевыми или вакантными октаэдрами, либо в грани, объединяющей вакантные тетраэдры. Выращенные кристаллы $LiNbO_3:B$ (0.55, 0.63 и 0.83 мол. % V_2O_3 в шихте), согласно спектрам ИК-поглощения [2], обладают пониженной концентрацией структурных дефектов Nb_{Li} по сравнению с кристаллом $LiNbO_{3\text{конг}}$ (0.976 мол. %): 0.553, 0.385 и 0.503 мол. %, соответственно. Более того, в кристаллах $LiNbO_3:B$ (0.55, 0.69 и 0.83 мол. % V_2O_3 в шихте) отмечено приближение отношения Li/Nb к стехиометрическому (0.967, 0.977 и 0.970, соответственно), а сужение ширины спектральных линий спектров КРС в геометрии рассеяния $Y(ZX)Y$ (240, 268 и 878 cm^{-1} , соответственно) свидетельствует об упорядочении структурных единиц катионной подрешётки кристаллов $LiNbO_3:B$ [3]. Таким образом, использование флюса V_2O_3 позволяет получить близкие к стехиометрическим монокристаллы $LiNbO_3:B$, демонстрирующие высокое оптическое качество и повышенное упорядочение структурных единиц катионной подрешётки.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-33-90025).

Список литературы

1. Palatnikov M.N., Biryukova I.V., et al. // J. Cryst. Growth. 2014. V. 386. P. 113-118.
2. Sidorov N.V., Teplyakova N.A., et al. // Tech. Phys. 2020. V. 65. № 4. P. 627-634.
3. Sidorov N.V., Palatnikov M.N., et al. // Integr. Ferroelectr. 2019. V. 196. № 1. P. 39-42.

А.В. СОСУНОВ, А.Б. ВОЛЫНЦЕВ

Пермский государственный национальный исследовательский университет

**СТАБИЛЬНОСТЬ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ
НА ОСНОВЕ $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -ВОЛНОВОДОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ СОСТОЯНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
КРИСТАЛЛА НИОБАТА ЛИТИЯ**

Приведены результаты экспериментов по стабильности работы интегрально-оптических схем на основе $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов после восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла ниобата лития. Показана связь структуры кристалла ниобата лития и дрейфовых характеристик интегрально-оптических схем. Показано, что восстановление нарушенного приповерхностного слоя кристалла ниобата лития приводит снижению времени дрейфа рабочей точки и повышению термостабильности интегрально-оптических схем.

A.V. SOSUNOV, A.B. VOLYNTSEV

Perm State National Research University

**STABILITY OF INTEGRAL-OPTICAL CIRCUITS BASED
ON $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -WAVEGUIDES DEPENDING
ON THE QUALITY OF THE NEAR-SURFACE LAYER
OF THE LITHIUM NIOBATE**

Presents the results of experiments on the stability of operation of integrated-optical circuits based on $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -waveguides after recovered of the disturbed near-surface layer of lithium niobate crystal. The relationship between the structure of the lithium niobate crystal and the drift characteristics of integrated-optical circuits is demonstrated. It is shown, that the recovery of the disturbed near-surface layer of lithium niobate crystal leads to a decrease in the drift time of operating point and an increase in the thermal stability of integrated-optical circuits.

Интегрально-оптические схемы (ИОС) (рис. 1) широко применяются в телекоммуникационных системах с высокой скоростью передачи данных и волоконно-оптических гироскопах, где необходима внешняя модуляция сигнала. Несмотря на значительный прогресс в производстве ИОС на основе ниобата лития (НЛ) [1], до сих пор нет однозначного решения одной из основных проблем – стабилизации рабочей точки (РТ) ИОС при их длительной эксплуатации. Известно [2], что основной причиной дрейфа РТ является релаксация электрических зарядов при приложении

напряжения к электродам ИОС. В [3] показано, что $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводы формируются в нарушенном приповерхностном слое НЛ. Изменения структуры приповерхностного слоя кристалла НЛ необходимо рассматривать с микроскопической точки зрения как увеличение числа точечных дефектов и дислокаций в области $H_xLi_{1-x}NbO_3$ -волноводов, что является важным с точки зрения стабильности работы ИОС.

Целью работы является анализ влияния приповерхностной структуры кристалла НЛ на стабильность работы ИОС. Была изготовлена партия ИОС после восстановления нарушенного приповерхностного слоя кристалла НЛ X-среза. На полученных экспериментальных образцах ИОС исследовали дрейф РТ при приложении постоянного напряжения в диапазоне ± 8 В и при изменении температуры в диапазоне 70 - 90 °С.

Время дрейфа РТ анализировали после смены полярности прикладываемого напряжения к электродам ИОС (рис. 2). Установлено, что для ИОС на основе восстановленного НЛ время дрейфа в 2,5 раза ниже по сравнению с контрольными образцами. На основе полученных данных температурных исследований были проведены расчёты энергии активации (E_a) внутреннего дрейфа РТ и установлено, что E_a для ИОС после восстановления нарушенного приповерхностного слоя НЛ превышает E_a контрольных образцов в 2 раза (0,79 и 0,42 эВ). Полученные результаты позволяют ожидать более длительной эксплуатации ИОС с меньшим числом отказов.

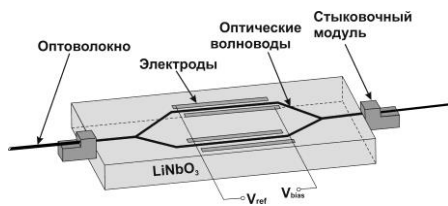


Рис. 1. Интегрально-оптическая схема

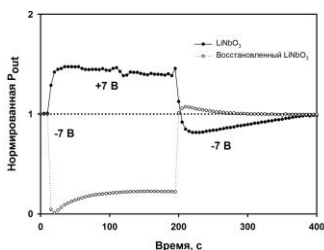


Рис. 2. Дрейф РТ от +7 к -7 В

Исследование поддержано в рамках программы развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, договор № 13.G25.31.0004 и РФФИ, договор № 20-42-596001.

Список литературы

1. Rao A., Fathpour S. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. V. 24. P. 1.
2. Salvestrini J.P., et al. // J. Light. Technol. 2011. V. 29. P. 1522.
3. Sosunov A.V., et al. // Optical Materials. 2019. V. 88. P. 176.

М.В. СМИРНОВ, Н.В. СИДОРОВ, М.Н. ПАЛАТНИКОВ,
В.Б. ПИКУЛЕВ¹

*Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.
¹Петрозаводский государственный университет*

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В БЛИЖНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ НОМИНАЛЬНО ЧИСТЫХ КРИСТАЛЛОВ НИОБАТА ЛИТИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО РАЗНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

В работе представлены сравнительные исследования спектров фотолюминесценции в ближней ИК-области кристаллов LiNbO_3 конгруэнтного и стехиометрического составов, полученных по разным технологиям.

M. V. SMIRNOV, N. V. SIDOROV, M. N. PALATNIKOV,
V. B. PIKULEV¹

*Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw
Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region
¹Petrozavodsk State University*

PHOTOLUMINESCENCE IN NEAR IR-RANGE OF NOMINALLY PURE LITHIUM NIOBATE CRYSTALS OBTAINED BY DIFFERENT TECHNOLOGIES

The photoluminescence in near IR-range of nominally pure lithium niobate crystals grown by different technologies was investigated.

Кристаллы ниобата лития (LiNbO_3) обладают спонтанной поляризацией, которая обуславливает его уникальные сегнетоэлектрические свойства. Наличие собственных дефектов, в частности, ниобий в позиции лития (Nb_{Li}) и компенсационные дефекты (V_{Li} , V_{Nb}), в структуре LiNbO_3 приводят к появлению полос поглощения и спонтанной излучательной рекомбинации в окне прозрачности кристалла, что ограничивает спектр его применения в оптоэлектронике, лазерной и нелинейной-оптике. В данной работе представлено сравнительное исследование фотолюминесцентных свойств в ближней ИК-области спектра (700 - 1050 нм) кристаллов LiNbO_3 конгруэнтного и стехиометрического составов, выращенных из расплава с 48.6 и 58.6 мол. % Li_2O ($\text{LiNbO}_{3\text{конг}}$, $\text{LiNbO}_{3\text{стех}}$), и кристалла LiNbO_3 стехиометрического состава, выращенного из конгруэнтного расплава с

добавлением флюса 6.00 мол. % K_2O ($LiNbO_{3\text{стех}}:K_2O$). Кристаллы были получены методом Чохральского в воздушной атмосфере [1].

Регистрация спектров фотолюминесценции ($\lambda = 700 \div 1050$ нм) проводилась с помощью спектрографа SOL SL-100M с ПЗС-детектором FLI ML 1107 BlackIlluminated (Hamamatsu). Возбуждение люминесценции осуществлялось непрерывным He-Cd лазером ($\lambda_{\text{возб}} = 325$ нм, 15 мВт).

Фотолюминесцентные спектры всех кристаллов состоят из широкой люминесцентной полосы с максимумом при ~ 1.5 эВ (827 нм), которая состоит из ряда элементарных полос излучения (рис. 1). Природа максимума обусловлена поляроном малого радиуса Nb_{Li} , который проявляется в восстановленных кристаллах $LiNbO_3$. В кристалле $LiNbO_{3\text{конг}}$ наблюдается максимальная концентрация данных дефектов (6.0 мол. %) и с повышением стехиометрии происходит тушение люминесценции на 20 % относительно $LiNbO_{3\text{стех}}$. Однако, в кристалле $LiNbO_3:K_2O$ наблюдается усиление люминесценции в 2.6 раз относительно $LiNbO_{3\text{конг}}$. Известно [1], что кристаллы $LiNbO_3:K_2O$ обладают повышенным содержанием гидроксильных групп. Наличие в структуре кристалла $LiNbO_3$ большого количества OH-групп приводят к образованию комплексных дефектов, в частности, $Nb_{Li}-OH$, и, как следствие – к усилению люминесценции в ближней ИК-области. Другая причина усиления люминесценции может быть связана с разной термической предысторией исследуемых кристаллов.

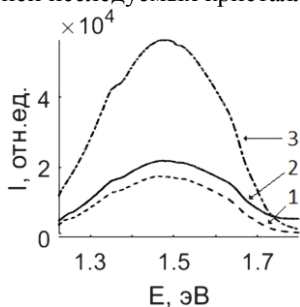


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции в ближней ИК-области для кристаллов $LiNbO_{3\text{стех}}$ (1), $LiNbO_{3\text{конг}}$ (2) и $LiNbO_3:K_2O$ (3)

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90078.

Список литературы

1. Сидоров Н.В., Палатников М.Н., Бобрева Л.А., Климин С.А. // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. № 4. С. 395-399.

Е.Н. САВЧЕНКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, А.В. ДУБИКОВ,
Д.Е. КУЗЬМИЧ, В.Я. ШУР¹, А.Р. АХМАТХАНОВ¹, А.А. ЕСИН¹
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹*Уральский федеральный университет, Екатеринбург*

НАБЛЮДЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ФОТОИНДУЦИРОВАННОЙ ПРОВОДИМОСТИ РЕГУЛЯРНЫХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР С НАКЛОННЫМИ СТЕНКАМИ В НИОБАТЕ ЛИТИЯ

В экспериментах по дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре с наклонными доменными стенками в кристалле 5 %MgO:LiNbO₃ в приложенном внешнем ступенчатом электрическом поле установлена линейная зависимость фотоиндуцированной проводимости от интенсивности зондирующего светового пучка в диапазоне от 0.4 до 237 мВт/мм².

E.N. SAVCHENKOV, S.M. SHANDAROV, A.V. DUBIKOV,
D.E. KUZMICH, V. Ya. SHUR¹, A.R. AKHMATKHANOV¹,
A.A. ESIN¹

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

¹*Ural Federal University, Ekaterinburg*

LIGHT DIFFRACTION ON PERIODICALLY POLED DOMAIN STRUCTURES WITH ICLINED WALLS IN LITHIUM NIOBATE CRYSTAL IN AN APPLIED STATIC ELECTRIC VOLTAGE

Linear dependence of photoinduced conductivity on intensity of probing light beam in the range from 0.4 to 237 mW/mm² is established in Bragg diffraction experiments on periodical domain structure with inclined domain walls in crystal 5 %MgO:LiNbO₃ in applied external static electric voltage.

Спад эффективности дифракции Брэгга на регулярной доменной структуре (РДС) в кристалле 5 %MgO:LiNbO₃, имеющей наклонные доменные стенки, после приложения к нему постоянного электрического напряжения, связывается с экранировкой внешнего поля внутренним, возникающим вследствие перераспределения объемного электрического заряда по этим стенкам [1]. Наклонные стенки являются заряженными и характеризуются проводимостью, на несколько порядков превосходящей проводимость монодоменного образца 5 %MgO:LiNbO₃. При приложении к РДС электрического поля возникающие токи приводят к

перераспределению заряда вдоль стенок, и, как следствие, к экранировке внешнего поля. Обнаруженная в [1] зависимость фотоиндуцированной проводимости стенок от интенсивности зондирующего лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 633$ нм имела линейный характер в диапазоне от 1.4 до 49 мВт/мм². В настоящем сообщении представлены результаты исследования фотоиндуцированной проводимости РДС в том же образце 5 %MgO:LiNbO₃ в более широком диапазоне интенсивностей излучения с $\lambda = 633$ нм.

В экспериментах гауссов лазерный пучок с $\lambda = 633$ нм и апертурой 0.7 мм, поляризованный вдоль оси Z и фокусируемый в середину образца сферической линзой, распространялся в плоскости XY под брэгговским углом к оси Y с преобразованием в дифрагированную волну на длине взаимодействия 2 мм. По изложенной в [1] методике из временных зависимостей релаксации эффективности дифракции Брэгга после воздействия внешнего напряжения с $U_0 = \pm 500$ В были рассчитаны экспериментальные значения эффективной фотоиндуцированной проводимости изучаемого образца, представленные точками на рис. 1.

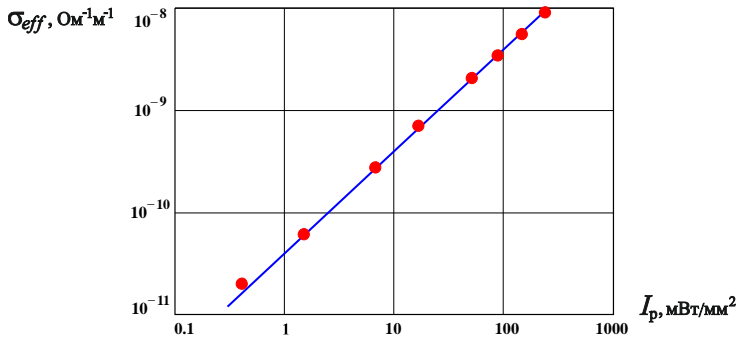


Рис. 1. Зависимость эффективной фотоиндуцированной проводимости образца 5 %MgO:LiNbO₃ с РДС от интенсивности зондирующего лазерного пучка

Аппроксимирующая прямая $\sigma_{eff} = B_{ph} I_p$ на рис. 1 соответствует коэффициенту фотопроводимости РДС $B_{ph} = 6.6 \cdot 10^{-14}$ Ом⁻¹Вт⁻¹м.

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

Список литературы

1. Савченков Е.Н., Дубиков А.В., Шараева А.Е., Буримов Н.И., Шандаров С.М., Есин А.А., Ахматханов А.Р., Шур В.Я. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. Вып. 10. С. 644.

И.В. ГРИЩЕНКО, Ю.С. СТИРМАНОВ¹, А.В. КОНЯШКИН¹,
О.А. РЯБУШКИН¹

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

*¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПТИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ТРИБОРАТА ЛИТИЯ

Представлены результаты экспериментов по измерению коэффициентов оптического поглощения и рассеяния мощного лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах трибората лития на длине волны 1070 нм методом пьезорезонансной лазерной калориметрии.

I. V. GRISHCHENKO, Yu. S. STIRMANOV¹, A. V. KONYASHKIN¹,
O. A. RYABUSHKIN¹

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

¹Fryazino Branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

MEASUREMENTS OF OPTICAL ABSORPTION AND SCATERING OF HIGH-POWER LASER RADIATION IN LITHIUM TRIBORATE CRYSTALS

The optical absorption and scattering coefficients of high-power laser radiation at 1070 nm wavelength in nonlinear-optical lithium triborate crystals were measured using piezoelectric resonance laser calorimetry.

С увеличением мощности современных лазерных источников возрастают требования к качеству оптических элементов, в частности, нелинейно-оптических кристаллов, широко используемых для преобразования частоты излучения. Качество нелинейно-оптических кристаллов характеризуется коэффициентами оптического поглощения и рассеяния лазерного излучения в рабочем диапазоне длин волн.

Целью настоящей работы является измерение коэффициентов оптического поглощения и рассеяния мощного лазерного излучения в нелинейно-оптических кристаллах трибората лития (LBO) при воздействии непрерывного излучения одномодового волоконного

иттербиевого лазера с длиной волны 1070 нм. Мощность излучения достигала 300 Вт.

Упрощённая схема экспериментальной установки для проведения исследований методом пьезорезонансной лазерной калориметрии (ПРЛК) [1] представлена на рис. 1а. Исследуемый образец LBO помещался в конденсатор, образованный парой электродов. Напряжение с радиочастотного генератора подавалось в цепь, содержащую конденсатор и нагрузочное сопротивление R. Сигнал на нагрузочном сопротивлении измерялся с помощью синхронного детектора.

На первом этапе был определён коэффициент оптического поглощения α кристалла LBO на основании экспериментально измеренных кинетик его разогрева при взаимодействии с лазерным излучением. Температура кристалла определялась на основе измерений индуцированных сдвигов частот пьезоэлектрических резонансов LBO, предварительно откалиброванных по температуре в условиях однородного разогрева [1]. На втором этапе на поверхность LBO было нанесено поглощающее покрытие, и по измерению кинетик лазерного разогрева кристалла был определён коэффициент оптических потерь, обусловленный поглощением и рассеянием. С учётом ранее вычисленного коэффициента оптического поглощения было определено значение коэффициента оптического рассеяния μ_{scat} . В диапазоне интенсивностей от 2 МВт/см² до 40 МВт/см² в пределах ошибки измерений коэффициенты остаются постоянными и имеют значения: $\alpha = (5,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и $\mu_{\text{scat}} = (27 \pm 3) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ (рис. 1б).

В работе была продемонстрирована возможность применения метода ПРЛК для измерения малых коэффициентов оптического поглощения и рассеяния кристаллов при воздействии лазерного излучения высокой интенсивности.

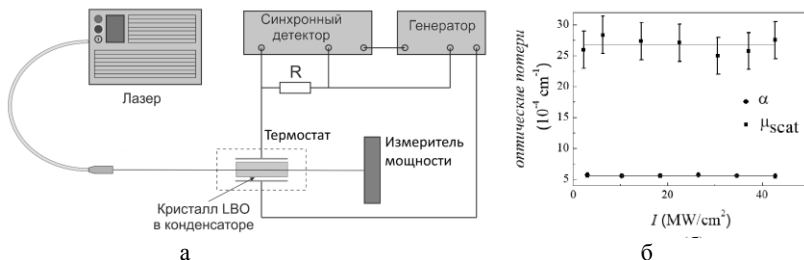


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а), зависимости коэффициентов оптического поглощения и рассеяния LBO от интенсивности лазерного излучения (б)

Список литературы

1. Pigarev A. V., et al. // Proc. SPIE. 2016. V. 9894. P. 98941.

А.Л. НОВОКОВСКАЯ, С.А. СЫЧУГИН, М.И. БАКУНОВ
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

ГЕНЕРАЦИЯ СГУСТКОВ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ РЕКТИФИКАЦИИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Предложена простая полуаналитическая модель для описания эффекта генерации квазистатических электрического и магнитного полей в условиях одновременного протекания процессов оптической ректификации и многофотонного поглощения фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. Модель позволяет исследовать динамику распространения квазистатических полей после их выхода из кристалла.

A.L. NOVOKOVSKAYA, S.A. SYCHUGIN, M.I. BAKUNOV
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

GENERATION OF QUASISTATIC FIELD BUNCHES BY OPTICAL RECTIFICATION OF ULTRA-SHORT LASER PULSES

We present a simple semianalytical approach to describe generating quasistatic electromagnetic fields by femtosecond laser pulses, which simultaneously experience optical rectification and multiphoton absorption in electro-optic crystals. The approach allows one to study the propagation dynamics of the generated fields outside the crystal.

В настоящее время наиболее эффективные «настольные» источники терагерцового излучения основаны на оптической ректификации фемтосекундных лазерных импульсов в электрооптических кристаллах. При высокой интенсивности оптической накачки становится существенной многофотонная генерация свободных носителей в кристалле, которая, как считается, оказывает негативное влияние на генерацию терагерцового излучения из-за поглощения носителями терагерцовых волн. Недавно, однако, был предсказан эффект генерации квазистатических электрического и магнитного полей всплеском тока рождённых носителей при их ускорении выпрямленным оптическим полем накачки [1-3]. Как было показано, квазистатические поля распространяются впереди импульса накачки в виде своеобразных предвестников и, вследствие этого, не испытывают поглощения остающимися позади импульса носителями. Использованное в [1-3] FDTD

моделирование не позволяет рассматривать распространение предвестников на большие расстояния, что представляет интерес для оценки возможностей их экспериментального наблюдения. В данной работе предлагается простой полуаналитический метод, позволяющий моделировать распространение предвестников на сколь угодно большое расстояние.

В предлагаемом методе непрерывное излучение полей всплесками тока, возбуждаемыми движущимся в кристалле вдоль оси z лазерным импульсом, моделируется излучением от дискретного набора токов,

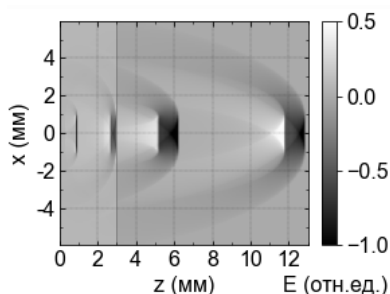


Рис. 1. Моментальные снимки электрического поля, генерируемого в кристалле толщиной 3 мм, при $a = 2$ мм и $\tau = 250$ фс

расположенных с шагом Δz (в расчётах бралось $\Delta z = 1$ мкм). Токи текут в направлении оси y по полосам, ширина a которых вдоль оси x равна ширине моделируемого лазерного пучка. Токи на полосах включаются последовательно через время $\Delta t = \Delta z/V$ (V – групповая скорость лазерного импульса в кристалле) и выключаются через время τ , равное длительности лазерного импульса. Создаваемые токами на полосах поля записываются в

аналитическом виде и численно суммируются.

На рис. 1 представлены моментальные снимки электрического поля внутри кристалла ($0 < z < 3$ мм) и после выхода из него. В процессе генерации области сильного поля (полевого сгустка) внутри кристалла величина поля в сгустке существенно не изменяется, длина сгустка растёт с расстоянием. После выхода из кристалла длина сгустка перестаёт меняться, сгусток начинает расширяться в поперечном направлении, и поле в нем начинает уменьшаться. Тем не менее, сгусток остаётся хорошо локализованным и плотным на расстояниях ~ 1 см. На больших расстояниях сгусток трансформируется в цилиндрическую волну.

Список литературы

1. Bakunov M.I., Maslov A.V., Tsarev M.V. // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. P. 063817.
2. Efimenko E.S., Sychugin S.A., Tsarev M.V., Bakunov M.I. // Phys. Rev. A. 2018. V. 98. P. 013842.
3. Tsarev M.V., Bakunov M.I. // Optics Express. 2019. V. 27. P. 5154.

М.А. КОСТЕНИКОВ, Н.С. БЕСПАЛОВ, В.В. КОЧЕТОВА,
С.С. ШМАКОВ, С.М. ШАНДАРОВ, Н.И. БУРИМОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ВКЛАД ОБРАТНОГО ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЭФФЕКТА В ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ОТКЛИК
ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СВЕТОВЫХ
ПУЧКОВ В КРИСТАЛЛЕ СРЕЗА (110)**

Представлены результаты экспериментальных исследований вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик при взаимодействии световых волн на отражательных голограммах, сформированных в нелегированном фоторефрактивном кристалле силиката висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110). Получены значения коэффициентов обратного флексоэффекта для исследуемого образца.

M.A. KOSTENIKOV, N.S. BESPALOV, V.V. KOCHETOVA,
S.S. SHMAKOV, S.M. SHANDAROV, N.I. BURIMOV

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

**CONTRIBUTION OF THE INVERSE FLEXOELECTRIC
EFFECT TO THE PHOTOREFRACTIVE RESPONSE
IN THE COUNTER-INTERSECTION OF LIGHT WAVES
A CRYSTAL (110)-CUT**

Abstract the results of experimental studies of the contribution of the inverse flexoelectric effect to the photorefractive response during the interaction of light waves on reflection holograms formed in photorefractive crystal $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (110)-cut. The values of the coefficients of the inverse flexoelectric effect for the test sample were obtained.

Экспериментальное исследование сигнала фазовой демодуляции в адаптивном голографическом интерферометре, основанном на отражательных голограммах в фоторефрактивных кристаллах разных срезов [1] позволяет выявлять вклады эффектов в фоторефрактивный отклик, разделять их по физическим механизмам и анализировать их количественно. Интерес к таким исследованиям вызван необходимостью описания новых явлений, наблюдаемых в устройствах динамической голографии.

Целью данной работы являлось исследование встречного взаимодействия для стационарного пучка накачки и фазомодулированного сигнального пучка, имеющие круговые поляризации разных знаков вращения, в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ среза (110). Используя известный подход [2], были получены выражения для гармоник сигнала фазовой демодуляции.

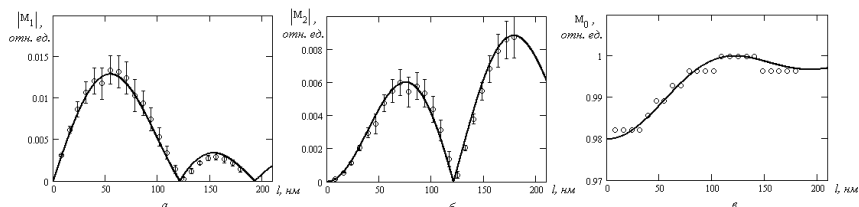


Рис. 1. Зависимости первой (а), второй (б) и нулевой (в) гармоник сигнала фазовой демодуляции от амплитуды колебаний l

Сплошные кривые на данных графиках соответствуют расчёту нулевой, первой и второй гармоникам выходного сигнала фазовой демодуляции. При расчётах использовались следующие значения коэффициентов, характеризующие вклад во встречное взаимодействие абсорбционной составляющей голограммы (Γ_a), линейного электрооптического эффекта (Γ_{il}) и обратного флексоэлектрического (Γ_f):

$$\Gamma_a = -9,6 \text{ см}^{-1}; \Gamma_{il} = 9 \text{ см}^{-1}; \Gamma_f = 7,3 \text{ см}^{-1}. \quad (1)$$

Сравнение результатов расчёта и экспериментальных данных показывает, что они хорошо согласуются друг с другом для рассматриваемой модели встречного взаимодействия стационарного пучка накачки и фазомодулированного сигнального пучка, имеющих циркулярную поляризацию противоположного знака, в кристаллах силленитов среза (110).

По полученным значениям коэффициентов (1) был вычислен коэффициент обратного флексоэлектрического эффекта для исследуемого образца, составляющий 26 нКл/м.

Список литературы

1. Колегов А.А., Шандаров С.М., Симонова Г.В. и др. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 9. С. 847-852.
2. Шандаров С.М., Шамаков С.С., Буримов Н.И. и др. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. № 12. С. 699-702.

Н.Ф. НАУМЕНКО, А.И. ЧИЖИКОВ, К.Б. ЮШКОВ,
В.Я. МОЛЧАНОВ

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

АНАЛИЗ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕПОЛЯРИЗОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛЕ KY(WO₄)₂

В работе проанализированы возможные конфигурации изотропной акустооптической дифракции неполяризованного излучения в моноклинных кристаллах калий-иттриевого вольфрамата KY(WO₄)₂. Рассмотренные геометрии акустооптической дифракции на квазисдвиговой акустической волне в плоскости симметрии кристалла позволяют создавать двухкоординатные дефлекторы неполяризованного излучения и устройства управления поляризацией лазерных пучков.

N.F. NAUMENKO, A.I. CHIZHIKOV, K.B. YUSHKOV,
V.Ya. MOLCHANOV

National University of Science and Technology MISIS, Moscow

ANALYSIS OF ACOUSTOOPTIC INTERACTION OF UNPOLARIZED RADIATION IN KY(WO₄)₂ CRYSTAL

Possible configurations of isotropic acousto-optic diffraction of unpolarized radiation in monoclinic crystals of potassium-yttrium tungstate KY(WO₄)₂ are analyzed. Specific geometries of acousto-optic diffraction by a quasi-shear acoustic wave in the crystal symmetry plane enable design of two-coordinate deflectors of unpolarized radiation and polarization controlling devices of laser beams.

Акустооптическая (АО) дифракция в двусосных кристаллах орторомбической и моноклинной систем представляет большой практический интерес благодаря разнообразию возможных геометрий АО-взаимодействия.

Рассмотрим акустооптическую дифракцию света в моноклинном кристалле калий-иттриевого вольфрамата (КИВ), KY(WO₄)₂, распространяющегося вдоль оси симметрии кристалла, на объёмных акустических волнах, распространяющихся в плоскости симметрии. Зависимость АО-качества M_2 от угла χ между направлением волнового вектора ультразвука и осью N_m показана на рис. 1 для квазисдвиговой

акустической моды. Для каждой из поляризаций света зависимость $M_2(\chi)$ имеет два максимума и два нуля [1].

Для создания модуляторов неполяризованного света используются такие геометрии АО-взаимодействия, при которых величины АО-качества одинаковы или близки для двух оптических мод кристалла. В кристалле КИВ такие геометрии существуют как для квазисдвиговой, так и для квазипродольной акустической моды. Угол между двумя конфигурациями $\chi = -38^\circ$ и $\chi = 56^\circ$ в кристалле КИВ составляет 94° , что позволяет создавать двухкоординатные АО-дефлекторы.

Особый интерес также представляют конфигурации, в которых для одной из поляризаций $M_2 = 0$. В таких геометриях АО-взаимодействия ультразвуковая волна модулирует только одну из оптических мод кристалла, что позволяет управлять поляризацией выходного излучения. Существование таких геометрий АО-взаимодействия в моноклинных кристаллах возможно только для квазисдвиговой моды [2]. В кристалле КИВ дифракция только медленной моды ($p_f = 0$) имеет место при $\chi = -77^\circ$ и $\chi = 8^\circ$, а дифракция только быстрой моды ($p_s = 0$) имеет место при $\chi = -58^\circ$ и $\chi = 30^\circ$.

В докладе обсуждаются перспективные применения акустооптических приборов на основе рассмотренных геометрий дифракции в кристалле КИВ.

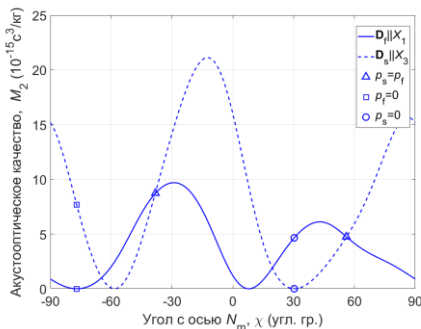


Рис. 1. Акустооптическое качество изотропной дифракции на квазисдвиговой моде ОАВ в плоскости симметрии кристалла КИВ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (20-07-00115).

Список литературы

1. Mazur M.M., et al. // Ultrason. 2017. V. 73. P. 231.
2. Yushkov K.B., et al. // Proc. SPIE. 2019. V. 10899. P. 1089913.

С.А. ТРЕТЬЯКОВ, И.А. КАПЛУНОВ, С.В. МОЛЧАНОВ

Тверской государственной университет

ЛАЗЕРНЫЙ ПРОБОЙ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОНОКРИСТАЛЛА ПАРАТЕЛЛУРИТА

Проведены профилометрические исследования поверхности монокристалла парателлурифта после лазерного разрушения, вызванного воздействием фемтосекундного лазера. С помощью поляризационно-оптического метода получены интерференционные картины, которые позволили сделать выводы о геометрии и размерах областей с искажением оптической индикатрисы.

S.A. TRETIKOV, I.A. KAPLUNOV, S.V. MOLCHANOV

Tver State University

LASER-INDUCED DAMAGE IN SURFACE LAYER OF SINGLE CRYSTAL OF PARATELLURITE

Executed profilometric studies of the surface of a paratellurite single crystal after laser-induced damage under the action of a femtosecond laser. Obtained interference patterns by the polarization-optical method which allowed us to draw conclusions about the geometry and size of regions with distorted optical indicatrix.

Применение монокристаллов парателлурифта в качестве элементов проходной оптики при коррекции формы ультракоротких лазерных импульсов в сверхмощных лазерных системах делает актуальными исследования лазерной прочности и процессов несобственного оптического разрушения, приводящих к возникновению поверхностных и объёмных оптических дефектов, в том числе локальных искажений оптической индикатрисы. Поверхность является областью, где имеет место повышенное поглощение оптического излучения, что связано как с дефектностью самого приповерхностного слоя, так и с адсорбцией на поверхности поглощающих веществ [1]. В работе [2] рассмотрен пьезооптический эффект, наблюдаемый вокруг дислокационных ямок травления парателлурифта, и сделаны выводы о значительных (по сравнению с самими дислокационными ямками) по размеру областях с искажением оптической индикатрисы.

Целью работы являлось профилометрическое и поляризационно-оптическое исследование областей разрушения приповерхностного слоя

монокристалла парателлурита, вызванного воздействием фемтосекундного лазера ($\lambda = 800$ нм).

На образец парателлурита на плоскость [001] воздействовали лазерным излучением (средняя мощность – 120 мВт) до появления видимых лазерных пробоев. Длительность воздействия на каждую точку составила 10 секунд под углом 7 градусов к нормали поверхности. С помощью оптического профилометра NanoMap WLI 1000 получены профили областей с кратерами, образованными в процессе разрушения приповерхностного слоя (рис. 1). Интерференционная картина (рис. 2), полученная с использованием оптической схемы для регистрации коноскопических изображений, позволила выявить области с искажением оптической индикатрисы.

По результатам исследований были сделаны следующие выводы: размеры кратеров отличаются друг от друга, несмотря на исходную однородность образца – как по плотности дислокаций, так и по качеству полировки, что позволяет предположить существенный вклад в процессы разрушения нульмерных дефектов (примесей и центров рассеяния). Геометрия областей с искажением оптической индикатрисы соответствует кристаллографии образца и не зависит от формы кратера и соответственно от угла падения лазерного луча, а их размеры значительно превышают размеры кратеров ($\approx 2,6 - 2,7$ мм при размерах кратеров $\approx 0,1 - 0,32$ мм).

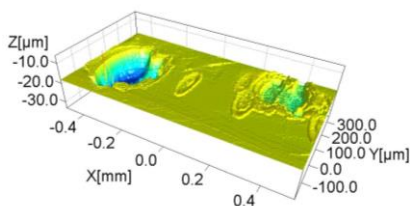


Рис. 1. 3D профиль поверхности парателлурита с кратерами

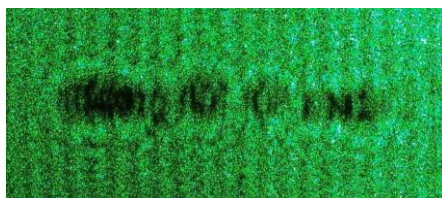


Рис. 2. Интерференционная картина области искажения оптической индикатрисы

Список литературы

1. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000.
2. Иванова А.И. Микроморфология поверхности и дислокационная структура крупногабаритных оптических кристаллов германия и парателлурита. Дисс. ... к.ф.м.н. Твер. гос. Университет. Тверь, 2015.

В.А. КРИВЕНКОВ¹, П.С. САМОХВАЛОВ¹, И.Р. НАБИЕВ^{1,2},
Ю.П. РАКОВИЧ^{3,4}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Университет города Реймса Шампань-Арденн, Франция

³Университет Страны Басков, Сан-Себастьян, Испания

⁴Баскский фонд науки, Бильбао, Испания

ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА ПАРСЕЛЛА НА ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ВБЛИЗИ САМООРГАНИЗОВАННЫХ МАССИВОВ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ

Созданы тонкоплёночные материалы на основе полупроводниковых квантовых точек ядро-(многослойная оболочка) CdSe-(ZnS/CdS/ZnS) и самоорганизованных массивов плазмонных наночастиц. Экспериментально обнаружено, что степень перекрытия спектра фотолюминесценции квантовых точек и спектра экстинкции плазмонных наномассивов оказывает решающее влияние на величину квантового выхода излучения экситонных и биэкситонных состояний.

V.A. KRIVENKOV¹, P.S. SAMOKHVALOV¹, I.R. NABIEV^{1,2},
Yu.P. RAKOVICH^{3,4}

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

²Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France

³Basque University, San Sebastian, Spain

⁴Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

INFLUENCE OF THE PURCELL EFFECT ON THE PHOTOLUMINESCENCE OF QUANTUM DOTS NEAR THE SELF-ORGANIZED ARRAYS OF PLASMON NANOPARTICLES

Thin-film materials based on semiconductor quantum dots core-(multishell) CdSe-(ZnS/CdS/ZnS) and self-organized arrays of plasmonic nanoparticles have been fabricated. It was found experimentally that the degree of the overlap of the photoluminescence spectrum of quantum dots and the extinction spectrum of plasmon modes of arrays crucially affect the quantum yield of the emission of exciton and biexciton states.

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) широко используются в фотоэлектрических и оптоэлектронных устройствах, благодаря их

уникальным оптическим свойствам [1]. Одним из перспективных методов дополнительного улучшения фотолюминесцентных (ФЛ) свойств КТ является создание их гибридов с плазмонными наночастицами (ПНЧ). Из-за возбуждения резонансных локализованных плазмонных мод плотность фотонных состояний значительно увеличивается вблизи поверхности ПНЧ. Эти условия могут приводить к увеличению скорости радиационного распада экситонов в близко расположенных КТ – эффекту Парселла [2]. Целью данной работы было изучения влияния степени перекрытия плазмонного спектра со спектром ФЛ КТ на реализацию эффекта Парселла для экситонных и биекситонных состояний в КТ.

В представленной работе мы изготовили тонкоплёночные гибридные материалы на основе КТ ядро-(оболочка) CdSe-(ZnS/CdS/ZnS) в матрице полиметилметакрилата (ПММА), покрытые самоорганизованным массивом коллоидных серебряных нанопризм. В созданном гибридном материале максимум спектра плазмонных мод массива нанопризм перекрывался с максимумом спектра ФЛ квантовых точек. Изменение скорости радиационного распада экситонов и биекситонов в КТ рассчитывалось путем сравнения изменений интенсивности и времён жизни ФЛ для одной и той же КТ до и после нанесения массива нанопризм. Полученные результаты показали значительное ускорение радиационного распада как экситонов, так и биекситонов в КТ, а также увеличение квантового выхода ФЛ биекситонов, при расстоянии между КТ и ПНЧ вплоть до 100 нм.

Для сравнения мы также создали материал с аналогичной структурой, но в качестве плазмонных наночастиц были использованы золотые наностержни. При этом спектр плазмонных мод самоорганизованного массива этих наностержней имел меньшую, чем в случае нанопризм, степень перекрытия со спектром ФЛ КТ. В результате эффект Парселла был также обнаружен в данных структурах, однако коэффициент ускорения радиационного распада экситонов и биекситонов в этом случае был на порядок меньше, чем при использовании серебряных нанопризм. Таким образом, результаты данного исследования приводят к более глубокому пониманию влияния степени перекрытия спектров плазмонных мод и ФЛ КТ на квантовый выход ФЛ КТ.

Список литературы

1. Litvin A.P., et al. //Journal of Materials Chemistry A. 2017. V. 5. № 26. P. 13252-13275.
2. Krivenkov V., et al. //Annalen der Physik. 2020. V. 532. № 8. P. 2000236.

А.А. ИВАНОВ^{1,2}, В.В. ЧАЛДЫШЕВ^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

ЭКСИТОН-ПОЛЯРИТОННОЕ РЕЗОНАНСНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ ОТРАЖЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ ИЗ 100 КВАНТОВЫХ ЯМ InGaN ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Спектры оптического отражения и пропускания резонансной брэгговской структуры (РБС) со 100 квантовыми ямами (КЯ) InGaN исследованы при различных углах падения и поляризациях падающего света при комнатной температуре. Мы представляем результаты моделирования с использованием матриц переноса, которые очень хорошо согласуются с результатами эксперимента. Параметр радиационного распада определен равным $(0,25 \pm 0,02)$ мэВ, а параметр безызлучательного распада – 40 мэВ.

A.A. IVANOV^{1,2}, V.V. CHALDYSHEV^{1,2}

¹Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

²Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg

ROOM TEMPERATURE EXCITON-POLARITON RESONANT OPTICAL REFLECTION BY PERIODIC SYSTEM OF 100 InGaN QUANTUM WELLS

The optical reflectance and transmittance spectra of a resonant Bragg structure (RBS) with 100 InGaN quantum wells (QWs) are studied at different angles of incidence and polarizations of the incident light at room temperature. We present simulation results using transfer matrices agreeing very well with results of the experiment. The radiative decay parameter is determined to be (0.25 ± 0.02) meV and the nonradiative decay parameter is 40 meV.

Резонансные брэгговские структуры (РБС) представляют собой полупроводниковые гетероструктуры с квантовыми ямами (КЯ), демонстрирующие существенное усиление взаимодействия света с веществом, когда длина волны брэгговского резонанса в отражении соответствует энергии возбуждения экситона [1]. В таких системах наблюдается уменьшение излучательного времени жизни экситонов в КЯ в N раз, где N – число квантовых ям в системе. Данный факт, а также большая энергия связи экситона в GaN, позволяет наблюдать

существенный вклад экситонного резонанса в отражение света при комнатной температуре [2]. Поскольку экситонные состояния чувствительны к приложению электрического поля, возникает перспектива к созданию электрооптического модулятора.

Измерения спектров оптического отражения и пропускания РБС со 100 КЯ InGaN/GaN проводились для разных углов падения и поляризаций света при комнатной температуре. С целью определения параметров экситонов в КЯ было проведено компьютерное моделирование оптических спектров, основанное на использовании метода матриц переноса, которые строятся на основе формул экситонного отражения и пропускания, приведённых в работе [1]. Экспериментальные результаты совместно с результатами расчёта представлены на рис. 1. Между расчётными и экспериментальными спектрами пропускания имеются существенные расхождения в области коротких длин волн. Наиболее важной причиной данных расхождений является хвост оптического поглощения в буферном слое и барьерах GaN. В расчёте использовались экситоны А, В и С типа с энергиями 3.15, 3.2 и 3.23 эВ соответственно (на рисунке указаны стрелками).

Предложенная нами модель позволяет получить хорошее соответствие между экспериментальными и расчётными спектрами, выполненными с учётом экситон-фотонного взаимодействия. Параметр радиационного затухания определён равным $(0,25 \pm 0,02)$ мэВ, а параметр нерadiационного затухания 40 мэВ.

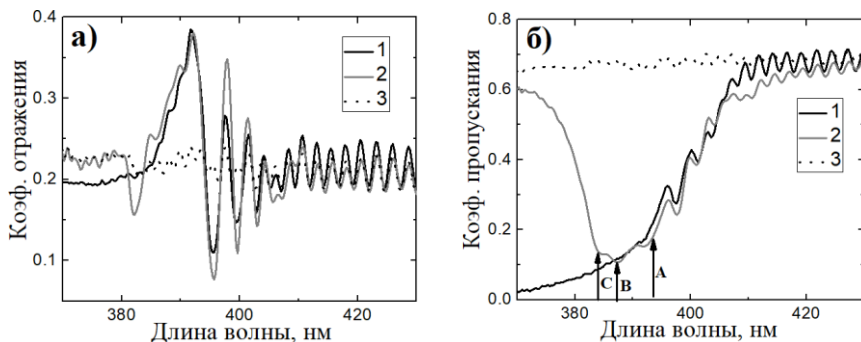


Рис. 1. Спектры оптического отражения (а) и пропускания (б) РБС со 100 КЯ InGaN: 1 – эксперимент, 2 – расчёт с экситонами, 3 – расчёт без экситонов

Список литературы

1. Ivchenko E.L., Nesvizhskii A.L., Jorda S. // Phys. Solid State. 1994. V. 36. P. 1156-1161.
2. Chaldyshev V.V., Bolshakov A.S., et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. P. 251103.

Е.Р. БУРМИСТРОВ, Л.П. АВАКЯНЦ, А.В. ЧЕРВЯКОВ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ДВУМЕРНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА В СВЕТОДИОДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ InGaN/GaN

Предложена математическая модель по расчёту транспортного времени жизни и подвижности двумерного электронного газа (ДЭГ) в условиях доминирующего механизма пьезоэлектрической релаксации. Показано, что внутренние механические напряжения в LED структурах с гексагональной сингонией на основе InGaN/GaN приводят к неоднородному распределению встроенного электрического поля вдоль активного слоя. Полученная в рамках предложенной модели оценка напряжённости пьезоэлектрического поля в промышленных образцах LED составляет 1.5 - 2.5 МВ/см, при этом транспортное время принимает значение $\sim 10^{-9}$ с.

E.R. BURMISTROV, L.P. AVAKYANTS, A.V. CHERVYAKOV
Lomonosov Moscow State University

INFLUENCE OF MECHANICAL TANGENTIAL VOLTAGES ON THE INTEGRAL RADIATION INTENSITY OF InGaN/GaN LED STRUCTURES

A mathematical model for calculating the transport lifetime and mobility of a two-dimensional electron gas (2DEG) under the conditions of the dominant piezoelectric relaxation mechanism is proposed. It is shown that internal mechanical stresses in LED structures with a hexagonal system based on InGaN/GaN lead to an inhomogeneous distribution of the built-in electric field along the active InGaN layer. It was found that the intensity of the piezoelectric field reaches 1.5 - 2.5 MV/cm, while the transport time takes on a value of $\sim 10^{-9}$ s for industrial designs LED.

Квантово-размерные структуры, выращенные на основе соединений InGaN/GaN, применяют для изготовления устройств, работающих в ультрафиолетовом, синем и зелёном диапазонах оптического спектра [1]. Установлено, что механические напряжения между слоями InGaN и GaN являются причиной неравномерного распределения встроенного пьезоэлектрического поля, что приводит к увеличению доли безизлучательной рекомбинации для межзонных переходов и уменьшению квантового выхода люминесценции [2, 3]. Таким образом,

исследование внутренних электрических полей в активной области гетероструктур с целью увеличения эффективности работы светодиодов на основе InGaN/GaN, является актуальной задачей.

Целью данной работы является создание математической модели, позволяющей оценить транспортное время жизни двумерного электронного газа (ДЭГ), а также рассчитать распределение напряжённости пьезоэлектрического поля вдоль слоя InGaN.

Проведённое теоретическое исследование и математическое моделирование в условиях доминирующего механизма пьезоэлектрической релаксации основывалось на формализме квантово-механических кинетических процессов и решении уравнения Больцмана. На рис. 1. представлено полученное теоретическое распределение пьезоэлектрического поля вдоль активного слоя для серии промышленных LED гетероструктур, исследованных ранее [4, 5] методами модуляционной спектроскопии. Результаты расчётов свидетельствует о хорошем согласии теории с экспериментом.

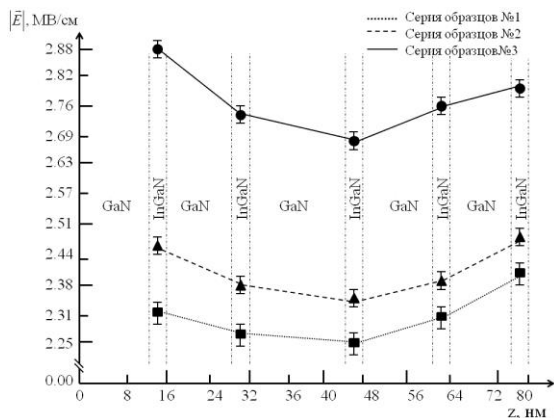


Рис. 1. Распределение напряжённости электрического поля вдоль активного слоя

Список литературы

1. Schubert E.F. Light-emitting diodes. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
2. Park S.-I. и др. // IEEE J. Quantum Electron. IEEE. 2012. V. 48. No. 4. P. 500-506.
3. Avakyants L., et al. // Phys. Status Solidi C. 2012. V. 9 (3) P. 818-821.
4. Avakyants L., et al. // Solid State Electron. Elsevier, 2017. V. 130. P. 45-48.
5. Асланян А.Э. и др. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53 № 4. С. 493-499.

А.С. МАТРОСОВА^{1,2}, Н.К. КУЗЬМЕНКО², С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3},
В.А. АСЕЕВ², В.В. ДЕМИДОВ¹, Н.В. НИКОНОРОВ²

¹Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург

²Университет ИТМО, Санкт-Петербург

³Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет), Санкт-Петербург

ПОЛЫЕ АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ СВЕТОВОДЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ТОНКОПЛЁНОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ $Gd_2O_3:Nd^{3+}$

С использованием полимерно-солевого метода синтезированы тонкоплёночные покрытия с нанокристаллами $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ на внутренней поверхности капилляров полого антирезонансного световода. Результаты рентгенофазового анализа измельчённого образца световода свидетельствуют об образовании кристаллов Gd_2O_3 размером от 25 до 42 нм с кубической структурой. Эмиссионные спектры образца световода показывают наличие в составе полученных нанокристаллов ионов Nd^{3+} с характерными полосами люминесценции.

A.S. MATROSOVA^{1,2}, N.K. KUZMENKO², S.K. EVSTROPIEV^{1,2,3},
V.A. ASEEV², V.V. DEMIDOV¹, N.V. NIKONOROV²

¹S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg

²ITMO University, Saint-Petersburg

³Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)

HOLLOW-CORE ANTIRESONANT FIBERS MODIFIED WITH $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ -BASED THIN-FILM COATINGS

Using the polymer-salt method, thin-film coatings with $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ nanocrystals are synthesized on the inner surface of capillaries of a hollow-core antiresonant fiber. The results of the X-ray analysis of the ground fiber sample indicate the formation of Gd_2O_3 crystals with a cubic structure ranging in size from 25 to 42 nm. Emission spectra of another fiber sample show the presence of Nd^{3+} ions with characteristic luminescence bands in the obtained nanocrystals.

Целью работы было получение кварцевого полого антирезонансного световода (КПАС), модифицированного нанокристаллами $Gd_2O_3:Nd^{3+}$, с последующей характеристикой его структурных и люминесцентных свойств. Основная идея заключалась в заполнении модифицирующим плёнкообразующим раствором полостей капилляров преформы КПАС и

перетягивании её в оптический элемент без структурной и фазовой трансформации нанокристаллов.

С использованием полимерно-солевого метода [1] синтезированы тонкоплёночные покрытия с нанокристаллами $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ на внутренней поверхности капилляров КПАС. За счёт выбора толщины стенок между капиллярами, составляющей 0,8 мкм, достигнуто совмещение окон прозрачности КПАС и длин волн возбуждения ($\lambda_{КПАС} = 450 - 550$ нм, $\lambda_{возб} = 532$ нм) и эмиссии люминесценции ($\lambda_{КПАС} = 1000 - 1200$ нм, $\lambda_{эм} = 1064$ нм). Результаты рентгенофазового анализа измельчённого образца КПАС свидетельствуют об образовании кристаллов Gd_2O_3 размером от 25 до 42 нм исключительно с кубической структурой.

Эмиссионные спектры образца КПАС показывают наличие в составе полученных нанокристаллов ионов Nd^{3+} с характерными полосами люминесценции, а именно, основным пиком излучения на длине волны 1064 нм и двумя неосновными вблизи 900 и 1350 нм (рис. 1а). Кинетика люминесценции КПАС описывается двумя экспоненциальными зависимостями со значениями времён затухания $\tau_1 = 12$ и $\tau_2 = 233$ мкс (рис. 1б). По мнению авторов, это явление связано с кубической структурой кристаллов Gd_2O_3 . Наибольшее значение времени затухания аналогично таковому для прозрачной керамики $Y_2O_3:Nd^{3+}$ и несколько ниже, чем для объёмных кристаллов $YAG:Nd^{3+}$.

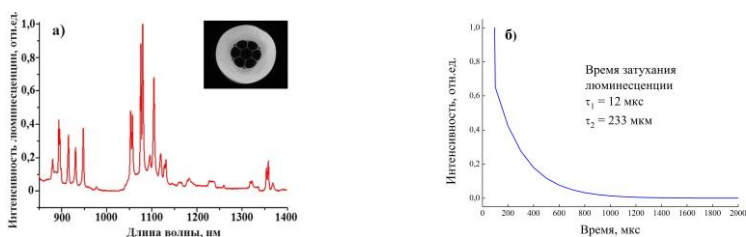


Рис. 1. Эмиссионный спектр КПАС, модифицированного нанокристаллами $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ с концентрацией неодима 0,8 мол. % (на вставке – изображение поперечного сечения КПАС диаметром около 100 мкм) (а) и время затухания люминесценции в рассматриваемом КПАС (б)

Изготовление КПАС выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ (проект № 19-19-00596), исследование люминесцентных свойств КПАС выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-32-90199 Аспиранты).

Список литературы

1. Evstropiev S.K., et al. // Quantum Electron. 2019. V. 49. № 12. P. 1145-1148.

О.Н. ШИШКАНОВ¹, А.П. БОЙЧЕНКО, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар
¹*АО «Сатурн», Краснодар*

СПЕКТРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ

Исследованы спектрально-оптические свойства разноразмерных частиц серебра, формирующих полихромные электрополевые изображения на галогенсеребряных фотоматериалах при электрополевой визуализации изделий фотоники. Показана корреляция оптической плотности таких изображений и максимумов спектров их поглощения.

O.N. SHISHKANOV¹, A.P. BOYCHENKO, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar
¹*JSC «Saturn», Krasnodar*

SPECTRAL OPTICAL PROPERTIES OF SILVER NANOPARTICLES FORMED BY ELECTRIC FIELD IN POLYMER MATRIX

The spectral and optical properties of silver particles of different sizes, which form polychromic electric field images on silver halide photographic materials, have been investigated during electric field imaging of photonics products. The correlation between the optical density of such images and the maximum of their absorption spectrum is shown.

В работе [1] нами была описана методика полихромно-электрополевой визуализации изделий фотоники на примере матриц оптических микролинз (МОМЛ) с акцентом на колориметрические свойства образующих электрополевые изображения (ЭПИ) этих изделий наночастиц (НЧ) серебра (Ag). Проведённые исследования [1] позволили не только выделить цветовой гаммой характерные детали МОМЛ, но и выявить особенности образования их ЭПИ на галогенсеребряных (AgHal) фотоматериалах при разной полярности прикладываемого напряжения, что подтверждают приведённые в настоящей работе спектры поглощения (в диапазоне 400 – 700 nm) отдельных участков ЭПИ МОМЛ (см. рис. 1). Из рис. 1 видно, что все их «отрицательные» ЭПИ имеют более высокую оптическую плотность (D) по сравнению с «положительными»

изображениями, а увеличение D ЭПИ влечёт за собой смещение максимума в более длинноволновую область.

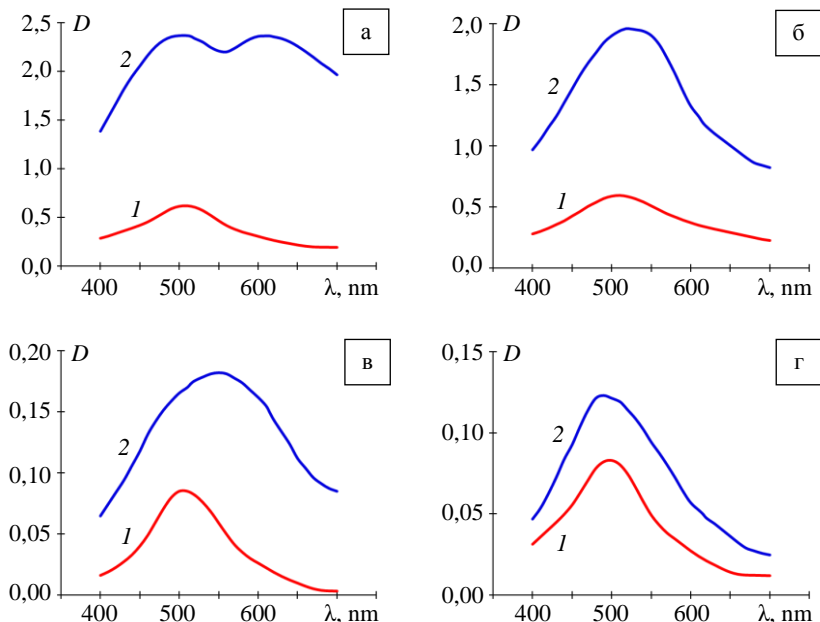


Рис. 1. Спектры поглощения отдельных участков полихромных ЭПИ МОМЛ при положительной (1) и отрицательной (2) полярностях напряжения на AgHal-фотоматериалах [1] «Agfa»: образец №1 (а), образец №2 (б) и «Retina»: образец №1(в), образец №2(г)

Кроме того, из рис. 1а видно, что при $D > 2$ в спектрах поглощения наблюдается два максимума, отстоящих друг от друга почти на 100 нм. Полученный результат согласуется с ранее полученным в [2] и характеризуется наличием в полимерной (желатиновой) матрице агломератов Ag размерами от 2 до 6 мкм, состоящих из НЧ Ag размерами от 25 до 450 нм и формой от сферической до эллипсоидальной, что в совокупности и определяет спектрально-оптические свойства таких НЧ.

Список литературы

1. Шишканов О.Н., Бойченко А.П. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 4 (72). С. 436-441.
2. Браницкий Г.А., Сташенок В.Д., Сергеева О.В. и др. // Химические проблемы создания новых материалов и технологий. 2003. Вып. 2. С. 38-55.

В.Н. ДЕРЕПКО, О.В. ОВЧИННИКОВ, М.С. СМИРНОВ,
Т.А. ЧЕВЫЧЕЛОВА, И.Г. ГРЕВЦЕВА, А.С. ПЕРЕПЕЛИЦА
Воронежский государственный университет

СПЕКТРЫ ЭКСТИНКЦИИ НАНОЧАСТИЦ ЗОЛОТА, ПОКРЫТЫХ ОБОЛОЧКАМИ ИЗ SiO₂

Представлены результаты, демонстрирующие трансформацию спектров экстинкции ансамблей сферических наночастиц золота (НЧ Au) при формировании оболочек из диоксида кремния (Au@SiO₂). Полученные спектральные данные оказались в хорошем согласии с результатами теоретических оценок в рамках квазистатического приближения теории Ми для структур Au@SiO₂ с толщиной оболочки 3 и 10 нм.

V.N. DEREPKO, O.V. OVCHINNIKOV, M.S. SMIRNOV,
T.A. CHEVYCHELOVA, I.G. GREVTSEVA, A.S. PEREPELTSIA
Voronezh State University

EXTINCTION SPECTRA OF GOLD NANOPARTICLES COATED WITH SiO₂ SHELLS

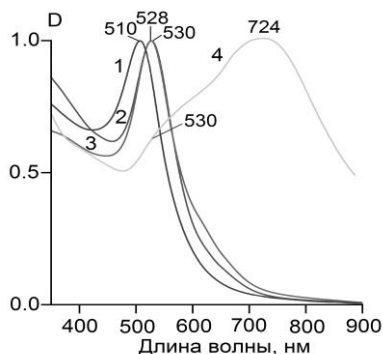
Presented results demonstrate the transformation of the extinction spectra of ensembles of spherical gold nanoparticles (Au NPs) during the formation of shells of silicon dioxide (Au@SiO₂). The obtained spectral data turned out to be in good cooperation with the results of theoretical estimates in the framework of the quasi-static approximation of the Mie theory for Au@SiO₂ structures with shell thicknesses of 3 and 10 nm.

Интерес к оптике металлических наночастиц (НЧ) и гибридных структур на их основе вызван перспективой решения ряда фундаментальных и научно-прикладных проблем в биологии, медицине, химии, оптоэлектронике, фотокатализе и т.д. [1, 2].

В данной работе представлены результаты, демонстрирующие влияние наличия и толщины диэлектрической оболочки из диоксида кремния (SiO₂) на положения спектра экстинкции света сферическими НЧ золота (далее НЧ Au), а также результаты теоретических оценок в рамках квазистатического приближения теории Ми. На рис. 1 представлены спектры экстинкции НЧ Au и НЧ Au@SiO₂ с различной толщиной оболочки SiO₂. Максимум спектра экстинкции света для сферических НЧ

Au средним диаметром 20 нм, расположен в области 510 нм (рис. 2, кривая 1), что хорошо согласуется с теоретическими оценками (табл. 1).

Таблица 1



Образец и толщина оболочки	Эксперимент	Теор. оценки
	λ_{max} , нм	λ_{max} , нм
НЧ Au	510	510
НЧ Au@SiO ₂ (3 нм)	528	524
НЧ Au@SiO ₂ (10 нм)	530	526
НЧ Au@SiO ₂ (20 нм)	724	530

Рис. 1. Экспериментальные спектры экстинкции НЧ Au (1);
НЧ Au@SiO₂ с толщиной оболочки 3 нм (2);
НЧ Au@SiO₂ с толщиной оболочки 10 нм (3);
НЧ Au@SiO₂ с толщиной оболочки 20 нм (4)

С увеличением толщины оболочки SiO₂ от 3 к 10 нм максимум спектра экстинкции смещается в длинноволновую область от 510 к 528, 530 нм соответственно. Теоретические расчеты показали, что толщина оболочки SiO₂, равная 20 нм на поверхности НЧ Au, способствует длинноволновому сдвигу резонанса от 510 к 530 нм. Однако в экспериментальных спектрах экстинкции НЧ Au@SiO₂ с толщиной оболочки 20 нм наблюдается значительное длинноволновое смещение максимума к 724 нм (рис. 2, кривая 4). Столь значительный спектральный сдвиг объяснён агрегацией НЧ Au и формированием общей оболочки SiO₂ на агломератах.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, проект НШ-2613.2020.2.

Список литературы

1. Lee J.Y., Park W., Yib D.K. // Toxicology Letters. 2012. V. 209. P. 51.
2. Chaudhuri R.G., Paria S. // Chemical Reviews. 2012. V. 112. P. 2373.
3. Shah K.W. Novel Nanomaterials - Synthesis and Applications. 2018. P. 109.
4. Bonaccorso F., Zerbetto M., Ferrari A.C., Amendola V. // J. Phys. Chem. 2013. V. 117. P. 13217.
5. Turkevich J., Stevenson P.C., Hillier J. // Discuss. Faraday Soc. 1951. V. 11. P. 55.
6. Kondorskiy A.D., Lebedev V.S. // Quantum Electronics. 2018. V. 48(11). P. 1035-1042.

С.В. САПАРИНА¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ЭФФЕКТЫ УСИЛЕНИЯ АНТИСТОКСОВОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В АМОРФНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОПЛЁНКАХ

Методом спектроскопии комбинационного рассеяния было обнаружено усиление антистоксовой компоненты комбинационного рассеяния света, которое примерно в 60 раз выше по сравнению с предсказаниями закона Больцмана. Углеродные плёнки были также охарактеризованы спектроскопическим параметром a , который содержит отношение сечений рассеяния на антистоксовой и стоксовой частоте колебаний. Показана зависимость данного параметра от толщины плёнки.

S.V. SAPARINA¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

ENHANCEMENT EFFECTS OF ANTISTOKES RAMAN SCATTERING OF LIGHT IN AMORPHOUS CARBON NANOFILMS

This work is devoted to the study of the enhancement / attenuation effects of anti-Stokes component in amorphous carbon nanofilms. Raman spectroscopy revealed an enhancement of the anti-Stokes component of Raman scattering, which is about 60 times higher compared to the predictions of Boltzmann law. The carbon films were characterized by the spectroscopic parameter a , which contains the ratio of scattering cross sections at anti-Stokes and Stokes frequencies. The dependence of this parameter on the film thickness is shown.

Ультратонкие плёнки из аморфного углерода нашли широкое применение в высокочувствительных сенсорах, наноэлектронике, оптоволоконных системах зондирования в нефтегазовой промышленности [1]. Однако важной проблемой, ограничивающей их повсеместное использование, является присущая материалу химическая неоднородность и структурная нестабильность при эксплуатации в условиях повышенных температур и давлений.

Целью настоящей работы является исследование температурных эффектов в углеродных наноплёнках методом спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) света. В качестве образцов использовались искривлённые стеклянные подложки, покрытые углеродным слоем различной толщины (от 1 до 100 нм).

Используя распределение Больцмана для числа фононов с энергией $h\omega$, температуру образца можно выразить через отношение интенсивностей антистоксовой к стоксовой линии, как:

$$T = \frac{h\omega}{k} \ln \left(a \frac{I_{AS}(\omega + \omega_0)^4}{I_S(\omega - \omega_0)^4} \right),$$

где ω_0 – частота возбуждающего лазера, k – постоянная Больцмана, a – спектроскопический параметр, который включает отношение сечений рассеяния на антистоксовой и стоксовой частоте колебаний. При комнатной температуре в отсутствии резонансных эффектов отношение антистоксовой к стоксовой части достигает 1/600. Методом КР-спектроскопии нами было обнаружено (рис. 1) усиление антистоксовой компоненты в КР-спектрах углеродных наноплёнок, которое примерно в 60 раз выше по сравнению с предсказаниями закона Больцмана. Причём, согласно рис. 2, данный эффект ослабевает с увеличением толщины плёнки.

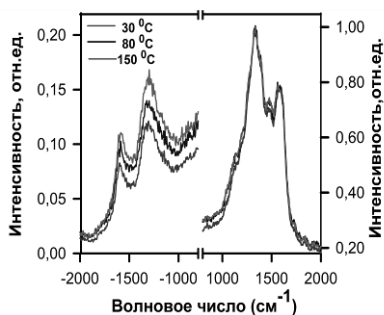


Рис. 1. КР-спектры углеродной плёнки при различных значениях температуры

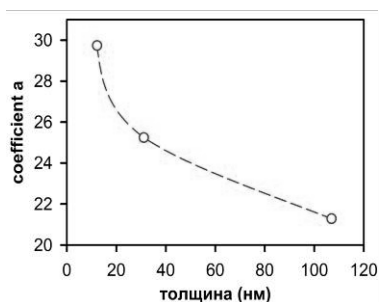


Рис. 2. Зависимость спектроскопического параметра a от толщины углеродной плёнки

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ (№ 19-12-00066).

Список литературы

1. Lemaire P.J., Lindholm E.A. Specialty Optical Fibers Handbook. Burlington: Elsevier Academic Press, 2007.

Н.С. КАРМАНОВА, А.Е. КРАСНОК¹
*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
¹*Городской университет Нью-Йорка, США*

РЕЖИМЫ СЛАБОЙ И СИЛЬНОЙ СВЯЗИ В ГИБРИДНЫХ СИСТЕМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ. ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ МЕТАПОВЕРХНОСТИ

В данной работе исследовалась возможность контролировать режим связи света с веществом в гибридных структурах, состоящих из резонансной структуры (в частности метаповерхности) и двумерного полупроводника. Данный контроль возможен за счёт регулировки скорости затухания поля в экситонной моде. Так же управляемый переход из режима слабой связи в режим сильной позволяет создать метаповерхности с перестройкой диапазона работы.

N.S. KARMANOVA, A.E. KRASNOK¹
*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny*
¹*Advanced Science Research Center, City University of New York, USA*

WEAK AND STRONG COUPLING IN HYBRID SYSTEMS WITH TWO-DIMENTIONALS SEMICONDUCTORS. TUNABLE METASURFACES

In this work, we investigated the possibility of light-matter coupling regime control in hybrid structures consisted of a resonant structure (for example metasurface) and a two-dimensional semiconductor. This control is possible by adjusting the exciton decay rate. Also, the controlled transition from the weak coupling mode to the strong one allows creating metasurfaces with tuning the spectral diapason of operation.

Из-за слабого взаимодействия фотонов друг с другом создание условий для проявления нелинейных эффектов на наноуровне затруднено. Поэтому материалы, в режиме сильной связи образующие гибридные состояния света с веществом, являются чрезвычайно важными для задач фотоники, квантовой оптики и т.д. Благодаря своим оптическим свойствам атомарно тонкие дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) являются крайне привлекательными для данных задач [1].

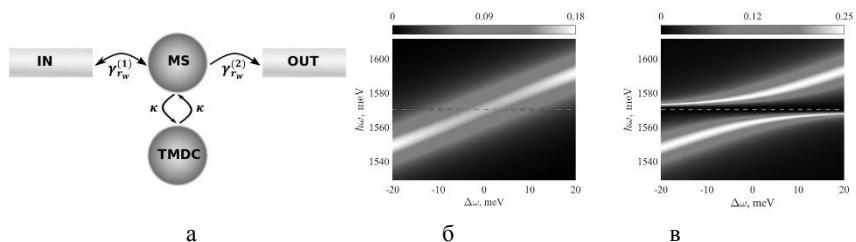


Рис. 1. Схематическое изображение системы в теории связанных резонаторов (а), коэффициент отражения структуры в режиме слабой связи (слабая накачка) (б); в режиме сильной связи (в)

В данной работе рассматривалась возможность контролировать режим связи света с веществом при изменении интенсивности накачки, благодаря нелинейным свойствам двумерных полупроводников. Расчёты проводились на основе данных из экспериментальных работ по изучению динамики насыщения поглощения в однослойных ДПМ [2]. Схематическое изображение системы в теории связанных резонаторов приведено на рис. 1а. На рис. 1б показан коэффициент отражения системы в холодном режиме, а на рис. 1в в условиях сильной накачки, когда поглощение излучения экситонным переходом достигает насыщения. На данном рисунке мы можем наблюдать значительное расщепление линий поглощения, характерное режиму сильной связи, и смещение резонансного пика метаповерхности на 10 мэВ.

В данной работе предложен метод для полностью контролируемой перестройки режима связи ДПМ и метаповерхности при помощи изменения интенсивности входного излучения. Эти исследования открывают путь к новому классу нанофотонных, оптоэлектронных и квантово-оптических устройств с низкими потерями, основанных на периодических фотонных структурах в сочетании с двумерными экситонными материалами.

Список литературы

1. Manzeli S., Ovchinnikov D., Pasquier D., Yazyev O.V., Kis A. 2D transition metal dichalcogenides. doi:10.1038/natrevmats.2017.33.
2. Nie, et al. Broadband nonlinear optical response of monolayer MoSe₂ under ultrafast excitation // Appl.Phys. Lett. 2018. V. 112. P. 031108.

Е.А. ЧЕРНЫХ¹, С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ ПОЛИМЕРНОЙ ПЛЁНКИ ПММА С ПОМОЩЬЮ ПЛАЗМОННОЙ TiN НАНОАНТЕННЫ

В нашей работе был исследован нагрев TiN плазмонной наноантенны на кремниевой подложке. Под действием монохроматического излучения 633 нм мощностью 16 мВт плазмонная наноантенна может нагреваться на сотни градусов. В случае покрытия наноантенны толстой полимерной ПММА плёнкой, максимальная температура нагрева TiN антенны возрастает в несколько раз, что объясняется существенной зависимостью поглощённой мощности от величины магнитного поля. Характеры профилей температур во всех слоях структуры представляют собой разные зависимости и подчиняются разным законам (в случае кремния – экспоненциальный закон, в нитрид титане – параболический, в полимере – гиперболический).

E.A. CHERNYKH¹, S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

PHOTO-INDUCED HEATING OF A POLYMER FILM USING A PLASMON TiN NANOANTENNA

In our work, the heating of a TiN plasmon nanoantenna on a silicon substrate was investigated. Under the influence of monochromatic radiation of 633 nm with a power of 16 mW, the plasmonic nanoantenna can heat up by hundreds of degrees. In the case of coating a nanoantenna with a thick polymer PMMA film, the maximum heating temperature of the TiN antenna increases several times, which is explained by the significant dependence of the absorbed power on the magnetic field. The nature of the temperature profiles in all layers of the structure are different dependences and obey different laws (in the case of silicon – exponential law, in titanium nitride – parabolic, in polymer – hyperbolic).

Моделирование для оценки температуры нагрева TiN наноантенны и полимерной плёнки ПММА с использованием программного обеспечения Lumerical. Первым этапом было моделирование и оценка мощности, поглощаемой TiN наноантенной при её облучении светом, с помощью FDTD Lumerical (3D – приложение для решения уравнений Максвелла

методом конечных разностей во временной области). Была построена трёхмерная модель, где TiN наноантенна представляет собой параллелепипед размером $200 \times 200 \times 50$ нм была помещена на кремниевую подложку размером $20 \times 20 \times 500$ мкм. Наноантенна освещалась гауссовым излучением (633 нм) р-поляризации с апертурой N.A. = 0.9. Мощность падающего излучения составляла 16 мВт. Вторым этапом было моделирование и оценка температуры нагрева TiN наноантенны и полимерной плёнки с помощью DEVICE Lumerical (3D – приложение для решения уравнений теплопроводности методом конечных элементов).

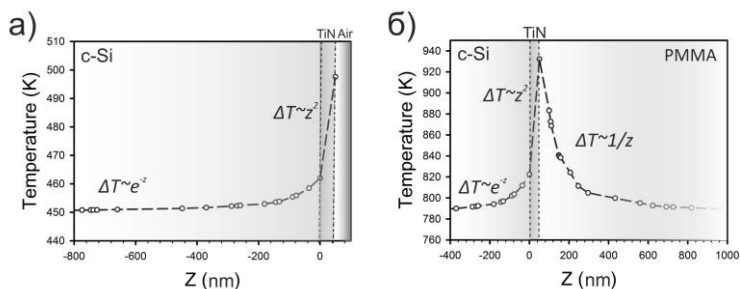


Рис. 1. Температурный профиль вдоль оси z системы TiN наноантенны на Si подложке (а); температурный профиль вдоль оси z системы TiN наноантенны на Si подложке, покрытых слоем полимерной плёнки ПММА (б)

На рис. 1а представлен профиль изменения температуры вдоль оси z системы TiN на Si подложке. Максимальное значение температуры достигается на поверхности (50 нм) нитрид титана и составляет 497 К. Внутри нитрид титана температура падает по параболическому закону, в подложке же изменение температуры происходит по экспоненциальному закону и температура выходит на плато при температуре 450 К. Температура TiN в случае с полимером достигает большего значения максимальной температуры 930 К (что объясняется усилением магнитного поля), подложка же выходит на постоянное значение 790 К. Профиль температуры в полимере подчиняется гиперболическому закону и выходит на плато так же при температуре 790 К.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта РФФИ (№ 19-12-00066).

Ю.А. КЛИШИН, Д.И. ЯКУБОВСКИЙ, П. МИШРА,
Е.В. КОНДРАТЮК, Г.А. ЕРМОЛАЕВ, М.С. МИРОНОВ,
Ю.В. СТЕБУНОВ, А.В. АРСЕНИН, В.С. ВОЛКОВ

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

ПОВЕРХНОСТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЁНОК ЗОЛОТА НА МОНОКРИСТАЛЛАХ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

В работе представлены результаты измерений поверхностного сопротивления ультратонких плёнок золота на монокристаллах дисульфида молибдена. Использован разработанный нами метод локального измерения поверхностного сопротивления на масштабах менее 100 мкм.

Yu.A. KLISHIN, D.I. YAKUBOVSKY, P. MISHRA,
E.V. KONDRATYUK, G.A. ERMOLAEV, M.S. MIRONOV,
Yu.V. STEBUNOV, A.V. ARSENIN, V.S. VOLKOV

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

SHEET RESISTANCE OF ULTRA-THIN GOLD FILMS ON MOLYBDENUM DISULFIDE SINGLE CRYSTALS

We present the results of measurements of sheet resistance of ultra-thin gold films on single crystals of molybdenum disulfide. Here we used the method of local measurement of surface resistance on scales less than 100 μm .

Ультратонкие металлические плёнки (толщиной менее 10 нм) представляют интерес для применений в области современной оптоэлектроники, нанофотоники и физики тонких плёнок [1, 2].

Ранее [3 - 6] было показано, что осаждённые на монослои MoS_2 золотые плёнки при толщинах менее 10 нм демонстрируют непрерывную морфологию поверхности, в то время как на подложках SiO_2 на этих же толщинах образуются перколированные золотые плёнки.

В настоящей работе исследованы свойства ультратонких золотых плёнок с толщинами от 3 до 10 нм, осаждённых методом электронно-лучевого испарения в высоком вакууме, на монокристаллы MoS_2 с латеральными размерами от 20 до 100 мкм. Структурные свойства плёнок

значительным образом влияют на поверхностное сопротивление плёнки, для измерения которого нами была разработана методика локального измерения сопротивления. Типичная схема измерений изображена на рис. 1.

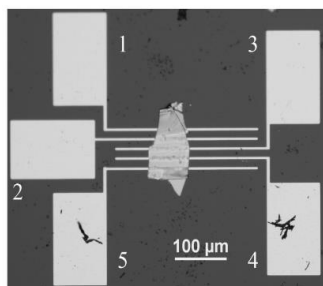


Рис. 1. Типовая схема измерений поверхностного сопротивления

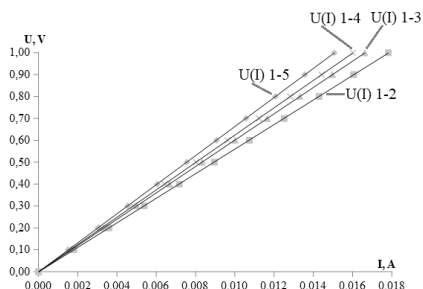


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики

Разработанный метод основан на технике переноса ультратонких плёнок золота на заранее изготовленные методом оптической литографии золотые контакты, после чего осуществляется измерение вольт-амперных характеристик с помощью зондовой станции. Пример полученных вольт-амперных характеристик для приведённой конфигурации контактов приведён на рис. 2. В докладе представлены результаты измерений с применением различных расчётных методов для золотых плёнок с толщинами от 3 до 10 нм на монокристаллах MoS_2 .

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России (0714-2020-0002) и РФФИ (18-37-20061 и 20-07-00840).

Список литературы

1. Yun J. Ultrathin metal films for transparent electrodes of flexible optoelectronic devices // *Advanced Functional Materials*. 2017. V. 27. P. 1606641.
2. Qian H., et al. Giant Kerr response of ultrathin gold films from quantum size effect // *Nature Communications*. 2016. V. 7. P. 13153.
3. Yakubovsky D.I., et al. Ultrathin and ultrasmooth gold films on monolayer MoS_2 // *Advanced Materials Interfaces*. 2019. V. 6. P. 1900196.
4. Volkov V.S., et al. Ultra-thin gold films: Towards 2D metals for photonic and optoelectronic applications // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1461. P. 012184.
5. Yakubovsky D.I., et al. Morphology and effective dielectric functions of ultra-thin gold films // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 1092. P. 012167.
6. Yakubovsky D.I., et al. Near-field characterization of ultra-thin metal films // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1461. P. 012193.

В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, С.И. МИКОЛУЦКИЙ,
В.Е. РОГАЛИН, С.А. ФИЛИН, Ю.В. ХОМИЧ, В.А. ЯМЩИКОВ,
И.А. КАПЛУНОВ¹, А.И. ИВАНОВА¹

*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
¹Тверской государственной университет*

ЛАЗЕРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ ГЕРМАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИМПУЛЬСА

При исследовании сканирования полированной поверхности монокристаллов германия сфокусированным частотно-импульсным излучением ультрафиолетового (УФ) NdYаG лазера выявлено, что при предпороговых плотностях энергии (при $E \sim 0,5 - 1,15$ Дж/см²), в отсутствие заметных следов кратерообразования, наблюдалось лазерное травление. Предполагается, что центрами зарождения абляции являются дислокации, выходящие на поверхность кристалла.

V.Yu. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKIY, S.I. MIKOLUTSKIY,
V.E. ROGALIN, S.A. FILIN, Yu.V. KHOMICH,
V.A. YAMSHCHIKOV, I.A. KAPLUNOV¹, A.I. IVANOVA¹
*Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint-Petersburg
¹Tver State University*

LASER ETCHING OF GERMANIUM BY EXPOSURE TO POWERFUL ULTRAVIOLET PULSE

When studying the processes occurring during scanning of the polished surface of germanium single crystals by focused pulse-frequency radiation of an ultraviolet (UV) NdYаG laser, it was found that at subthreshold energy densities (at $E \sim 0.5 - 1.15$ J/cm²), in the absence of noticeable traces of crater formation, laser etching was observed. It is assumed that the centers of ablation nucleation were dislocations, that emerge on the crystal surface.

Исследовались полированные поверхности {111} Ge (марка ГМО, n-тип, удельное сопротивление 47 Ом·см) после воздействия УФ наносекундными импульсами NdYаG лазера ($\lambda = 355$ нм) на оптическом профилометре Zygo NewView 7300 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV. На рис. 1а приведена РЭМ микрофотография образца Ge после воздействия сканирующим излучением с $E \sim 1,14$ Дж/см².

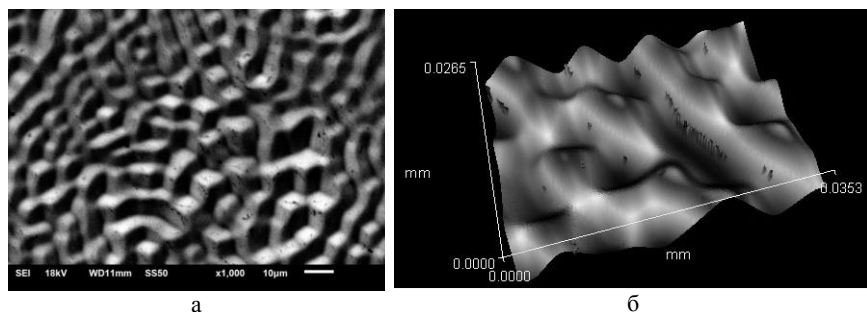


Рис. 1. Поверхность Ge после воздействия: 20 импульсов с $E \sim 1,14 \text{ Дж/см}^2$
 $(\lambda = 0,355 \text{ мкм}, \text{ длительность импульса } 10 \text{ нс}, \text{ частота } 100 \text{ Гц})$:
 РЭМ-микрофотография (а); трёхмерный профиль (б)

Порог появления кратера на Ge составлял $1,2 - 1,3 \text{ Дж/см}^2$. Приведены результаты при $E \sim 0,5 - 1,15 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 1). В отсутствие областей затвердевшего расплава на поверхности видны фигуры с правильной трёхгранной формой. Их концентрация составляла $(3 - 5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Они напоминают дислокационные ямки травления, получаемые обычно селективным химическим травлением. Это соответствует по порядку величины плотности дислокаций для монокристалла Ge марки ГМО. Дислокации образуют пирамидальные ямки с остроконечным углублением. Для алмазоподобных кристаллов на плоскости $\{111\}$ поверхностный атом, связанный с тремя атомами в объёме, имеет только одну разорванную связь. На выходах дислокаций происходит локальное увеличение скорости травления. "Дефектное" место травится с образованием фигуры (ямки), ограниченной плоскостями с наименьшей скоростью травления.

Мы наблюдали травление вследствие абляции. Поперечный размер полученных нами ямок был около $5 - 10 \text{ мкм}$. Их перекрытие привело к чередующейся картине трёхгранных пирамид, образованных плоскостями $\{111\}$. Изображения, полученные на профилометре, показывают скруглённые грани и вершины пирамид и высоту профиля $\sim 1 - 2 \text{ мкм}$.

Линейные размеры ямок свидетельствуют о быстром протекании процесса. Сформированы поверхности при воздействии на небольшую часть приповерхностного слоя Ge глубиной менее $10 - 15 \text{ мкм}$. Считая суммарное время воздействия излучения $\sim 200 \text{ нс}$, скорость формирования плоских граней в ямках составляет $\sim 0,1 - 0,3 \text{ м с}^{-1}$, что на несколько порядков превышает скорость формирования таких же граней при росте кристалла.

А.В. ОСИПОВ

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

ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ С ПОМОЩЬЮ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО УЗКОПОЛОСНОГО ЛАЗЕРА НА АЛЕКСАНДРИТЕ

В рамках данной работы обсуждается метод формирования наночастиц/нанокластеров Au, Ag и биметаллических соединений Au-Ag с помощью лазера с перестраиваемой длиной волны излучения. Наночастицы благородных металлов синтезировались из массивных мишеней золота и серебра в жидкость методом лазерной абляции. Варьирование длиной волны лазерного излучения позволило включить в лазерный эксперимент управляющий параметр, который обеспечил дополнительный контроль размеров получаемых наноструктур.

A. V. OSIPOV

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

LASER SYNTHESIS OF NOBLE METAL NANOPARTICLES USING ALEXANDRITE TUNABLE NARROW-BAND LASER

The work discusses a method of the formation of nanoparticles/nanoclusters of Au, Ag and bimetallic Au-Ag compounds using a laser with a tunable radiation wavelength. Nanoparticles of noble metals synthesized from massive gold and silver targets into a liquid by laser ablation. Varying the wavelength of laser radiation allows including a control parameter in the laser experiment, which provides an additional control of the dimensions of the resulting nanostructures.

При лазерной абляции твёрдых мишеней в жидкой среде широко используется метод синтеза наноструктур металлов, сплавов, оксидов, карбидов, гидроксидов и др. Возможность фрагментации является большим преимуществом метода воздействия на взвешенные наноматериалы, который может применяться для дальнейшего изменения их размера, формы и состава. Настраиваемая длина волны может быть ключом к дополнительному параметру управления.

Лазерная абляция активно применяется для синтеза наноструктур благородных металлов, таких как золото (Au), серебро (Ag), платина (Pt) и палладий (Pd) или их сплавы. Биметаллические структуры этих металлов

обладают улучшенной физической и химической стабильностью и селективностью по сравнению с изометрическими структурами. Различные способы управления позволяют изменять оптические свойства таких наноструктур в процессе их синтеза.

В данной работе мы использовали следующую схему лазерной абляции в жидкость (вода, этанол и др.): образование коллоидных систем Au, Ag получали перестраиваемым александритовым лазером со средней длиной волны генерации ($\lambda = 750$ нм, $I \sim 10^6$ Вт/см², $E \sim 2,2 \cdot 10^3$ Дж/см², частота следовая импульсов 30 Гц, $t = 10$ мин). Лазерное излучение фокусировали на границу раздела массивный образец–жидкость. Размер частиц в коллоидном растворе составлял примерно 8 нм.

Перспективным методом получения биметаллических кластеров является лазерное формирование коллоидных сплавов [1, 2]. Синтез коллоидных систем Au и Ag реализовывался методом лазерной абляции в жидкость. После этого две коллоидные системы были смешаны, и наночастицы были нанесены на подложку SiO₂ двумя разными способами: LDNC [3] и капельным осаждением с эффектом пиннинга [4].

Полученные коллоидные растворы исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (SEM) и просвечивающей электронной микроскопии (TEM). Для полученных коллоидных систем наночастиц благородных металлов излучалось поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние (SERS). Эксперименты проводились для этанольного раствора стандартного красителя (R6G).

Морфологические свойства осаждённых нанокластеров исследовали с помощью атомно-силовой микроскопии (ACM) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Обнаружено, что спектры пропускания полученных структур зависят от концентрации и размеров наночастиц золота и серебра в коллоидном растворе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-10022, частично в рамках проектов РФФИ № 20-02-00515 и № 20-32-90052.

Список литературы

1. Kucherik A., Ryabchikov Y., Kutrovskaya S., Al Kattan A., Arakelyan S., Itina T., Kabashin A. // ChemPhysChem: colloids with lasers. 2017. V. 18. Is. 9. P. 1185-1191.
2. Arakelian S., Kutrovskaya S., Kucherik A., Osipov A., Povolotckaia A., Povolotskiy A., Manshina A. // Optical and Quantum Electronics. V. 48. Is. 11. № 505.
3. Axelevitch A., Gorenstein B., Golan G. // Physics Procedia. 2012. V. 32. P. 1-13.
4. Antipov A.A., Arakelian S.M., Zimin S.P., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Osipov A.V., Prokoshev V.G. // Physics Procedia. 2012 V. 39. P. 401-408.
5. Antipov A.A., Kutrovskaya S.V., Kucherik A.O., Nogtev D.S. // Proceedings of SPIE. V. 7996. P. 799606.

В.С. ЖИГАРЬКОВ, Н.В. МИНАЕВ, В.И. ЮСУПОВ

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

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА МИКРООРГАНИЗМОВ В ГЕЛЕВЫХ МИКРОКАПЛЯХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ БИОПЕЧАТИ

Осуществлена оценка негативных факторов при лазерной биопечати с использованием оптоакустических методов. Приведены результаты исследования разрушения и модификации тонких металлических плёнок на стеклянных подложках при наносекундном лазерном воздействии в процессе лазерной печати гелевыми микрокаплями.

V.S. ZHIGARKOV, N.V. MINAEV, V.I. YUSUPOV

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

CHARACTERISTICS OF THE MICROORGANISMS TRANSFER IN GEL MICRO-DROPLETS IN LASER BIOPROPRINTING

The assessment of negative factors in laser bioprinting using optoacoustic methods has been carried out. The results of a study of the destruction and modification of thin metal films by nanosecond laser pulse in the process of laser printing by gel microdroplets are presented.

Технология лазерной биопечати крайне актуальна для биомедицинского и биотехнологического применения [1]. Одним из направлений лазерной биопечати является лазерная инженерия микробных систем [2]. С её помощью возможно быстро и эффективно выделять чистые культуры микроорганизмов из природных сообществ, например, для получения продуцентов биологически активных веществ (антибиотики, ферменты), создания микробных топливных элементов (быстрый скрининг микробных культур на способность к электрогенезу).

С использованием данного подхода удается переносить малый объём (от десятков пиколитров) вещества с малым числом (единичные клетки и их агрегаты) клеток [3]. Однако стоит учитывать, что условия, при которых осуществляется перенос, могут быть достаточно жёсткими [4].

В работе на основе измерений акустического отклика лазерной системы (рис. 1) приведена оценка амплитуд давлений в области лазерного импульсного воздействия в случае разных поглощающих

плёнок и при различных длительностях лазерного импульса. Показано, что зависимость амплитуды акустического отклика от энергии лазерного импульса с хорошей точностью является линейной, амплитуды давления при рабочих параметрах лазерной системы могут достигать значений в несколько сотен бар.

По данным электронной микроскопии исследован механизм разрушения плёнки в зависимости от величины лазерного флюенса и наличия гелевого слоя (рис. 2).

По оптическому отклику лазерной системы исследована динамика с наносекундным разрешением процессов разрушения поглощающих металлических плёнок, как в присутствии геля, так и без геля. Показано, что наличие геля приводит к повышению порога абляции, однако время, в течение которого завершается процесс структурных изменений материала плёнки, существенно не меняется.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках исполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части лазерных воздействий, гранта РНФ 20-14-00286 в части совершенствования технологии инженерии микробных систем.

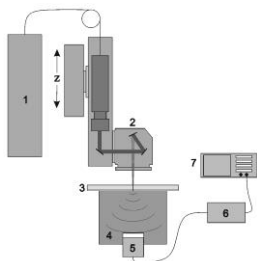


Рис. 1. Схема установки:

- 1 - импульсный лазер,
- 2 - гальваносканер, 3 - донорная подложка, 4 - кювета с водой,
- 5 - гидрофон, 6 - усилитель,
- 7 - осциллограф

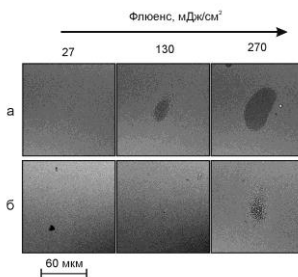


Рис. 2. СЭМ плёнки Ti: без геля (а), в присутствии геля (б)

Список литературы

1. Arnold C.B., Serra P., Piqué A. // Mrs Bull. 2007. V. 32(1). P. 23-31.
2. Yusupov V. I., Zhigarkov V.S., et al. // Quantum Electronics. 2017. V. 47(12). P. 1158.
3. Kochetkova T.V., Zayulina, K.S., et al. // IJSEM. 2020. V. 70(2). P. 1192-1202.
4. Zarubin V.P., Zhigarkov V.S., et al. // Quantum Electronics. 2019. V. 49(11). P. 1068.

С.Н. АНДРЕЕВ, С.А. МУХАНОВ, В.П. ТАРАКАНОВ¹

Московский политехнический университет

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ПРОТОНОВ, УСКОРЕННЫХ СВЕРХИНТЕНСИВНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Приведены результаты моделирования методом «частица в ячейке» взаимодействия релятивистского лазерного импульса с тонкой алюминиевой мишенью, на тыльной поверхности которой находится слой протонов. Проанализированы спектральные характеристики пучков протонов, ускоренных с тыльной поверхности мишени в зависимости от интенсивности лазерного импульса и толщины слоя протонов.

S.N. ANDREEV, S.A. MUKHANOV, V.P. TARAKANOV¹

Moscow Polytechnic University

¹Joint High Temperature Institute of the RAS, Moscow

COMPUTATIONAL AND THEORETICAL STUDY OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PROTON BEAMS ACCELERATED BY SUPER-INTENSE LASER PULSES

The results of PIC-simulation of the interaction of a relativistic laser pulse with a thin aluminum target with a proton layer on the back surface are presented. The spectral characteristics of proton beams accelerated from the back surface of the target are analyzed depending on the intensity of the laser pulse and the thickness of the proton layer.

Взаимодействие релятивистских ($I > 10^{18}$ Вт/см²) фемтосекундных лазерных импульсов с конденсированными средами и газовыми струями представляет существенный интерес, как с точки зрения фундаментальной науки [1], так и для приложений, включая УТС, материаловедение, лазерную медицину [2]. Пучки заряженных частиц мишени (как правило, электронов и протонов), ускоренные под действием таких лазерных импульсов до релятивистских энергий ($E \gg m_e c^2$), при взаимодействии с вторичными мишенями вызывают протекание в них ядерных реакций [3, 4], генерирование гамма-квантов тормозного излучения [5]. Для оптимизации выхода ядерных реакций необходимо формировать пучки

заряженных частиц с заданными спектральными характеристиками, т.е. управлять спектром заряженных частиц, путем подбора оптимальных параметров лазерного импульса и характеристик мишени.

Целью работы является расчётно-теоретическое исследование при помощи PIC-кода «Карат» [6] взаимодействия лазерного импульса ($\lambda = 1,055$ мкм, $I = 5 \cdot 10^{18}$ Вт/см², $\tau = 1$ пс, угол падения – 30 градусов) с тонкой алюминиевой мишенью, толщиной 10 мкм, на тыльной поверхности которой находится слой протонов. Толщина слоя протонов варьировалась в диапазоне от 0,1 мкм до 0,8 мкм. На рис. 1 приводится схема расчётной области в момент максимума интенсивности лазерного воздействия на мишень $t = 2$ пс. Как видно из рис. 1, на тыльной поверхности мишени с координатой $z = 20$ мкм формируется электростатическое поле (показано красным), ускоряющее протоны (синие частицы) в направлении правой границы расчётной области (лазерный импульс падает на мишень слева).

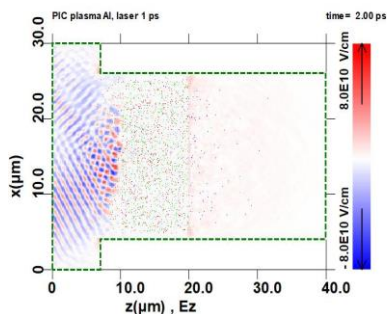


Рис. 1. Схема численного эксперимента

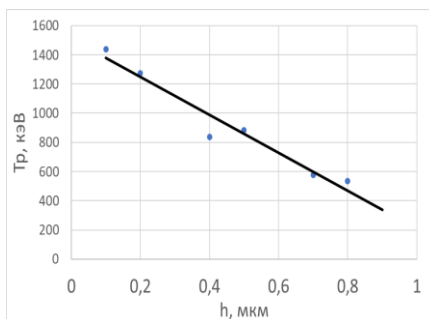


Рис. 2. Зависимость температуры протонов от толщины водородного слоя

Из проведённых расчётов следует, что функция распределения протонов по энергии с хорошей точностью является максвелловской. Зависимость температуры протонов от толщины мишени, приведённая на рис. 2, является линейной. При этом, максимальная энергия протонов не зависит от толщины водородного слоя и составляет 5000 ± 100 кэВ.

Список литературы

1. Andreev S.N. // Engineering Physics. 2012. V. 6. P. 44-52.
2. Ma Z., Lan H., Liu W., et al. // Matter Radiat. Extremes. 2019. V. 4. P. 064401.
3. Andreev S.N., Garanin S.G., Rukhadze A.A., et al. // Quantum Electronics. 2011. V. 41. P. 377.
4. Belyaev V.S., Matafonov A.P., Krainov V.P., et al. // Phys. of atomic nuclei. 2020. V. 83. P. 370.
5. Andreev S.N., Garanin S.G., Rukhadze A.A., et al. // Quantum Electronics. 2010. V. 40. P.355.
6. Tarakanov V.P. // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 149. P. 04024.

А.Э. АКМАЛОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ, В.А. КОСТАРЕВ,
Г.Е. КОТКОВСКИЙ

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ
СПЕКТРОМЕТРА ПРИРАЩЕНИЯ ИОННОЙ
ПОДВИЖНОСТИ С ЛАЗЕРНОЙ ИОНИЗАЦИЕЙ ПРОБЫ
ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХНИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ
ПАРОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

Метод спектрометрии ионной подвижности для детектирования взрывчатых веществ высоко оценивается за возможность обнаружения концентраций ниже 10^{-13} - 10^{-14} г/см³ при с использованием традиционных методов ионизации включающих коронный разряд и бета-излучение. Тем не менее, для некоторых взрывчатых веществ требуемый предел обнаружения может быть 10^{-15} - 10^{-16} г/см³. В работе проведено сравнение бета-источника ионизации ⁶³Ni и лазерной ионизации и определены параметры лазерной ионизации TNT, RDX, HMX, и PETN, которые позволяют улучшить предел обнаружения для портативных приборов. Лазер позволяет получать соотношения сигнала к шуму лучше, чем ⁶³Ni при оптимальной интенсивности для ионизации PETN и HMX соответственно 3×10^7 Вт/см² и 2.5×10^7 Вт/см². Проведена оценка пределов обнаружения: 3×10^{-15} г/см³ для RDX, 8×10^{-15} г/см³ для PETN и менее 3×10^{-15} г/см³ для HMX.

А.Е. АКМАЛОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ, В.А. КОСТАРЕВ,
Г.Е. КОТКОВСКИЙ

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**METHODS OF ENCHANCEMENT OF SENSITIVITY OF FAIMS
WITH LASER IONIZATION FOR DETECTION
OF ULTRA-LOW CONCENTRATIONS OF EXPLOSIVE VAPORS**

IMS method of detection of explosive substances is highly appreciated for capability of detection 10^{-13} - 10^{-14} g/cm³ with traditional ionization methods including corona discharge and beta radiation. However, for some explosives required limit of detection (LOD) can be as low as 10^{-15} - 10^{-16} g/cm³. In this study we compare a radioactive ⁶³Ni ionization source with a laser ionization source and reveal the parameters of laser ionization of TNT, RDX, HMX and PETN which can lower the limit of detection of portable devices. Laser can give a higher signal to noise ratio than ⁶³Ni at optimal laser intensity for PETN and HMX of 3×10^7 W/cm² and 2.5×10^7 W/cm², respectively. Limits of detection were estimated: 3×10^{-15} g/cm³ for RDX, 8×10^{-15} g/cm³ for PETN and less than 3×10^{-15} g/cm³ for HMX.

На основании анализа спектров приращения ионной подвижности, а также зависимостей положения ионных пиков в координатах «разделяющее напряжение-компенсирующее напряжение» для TNT, RDX, HMX, PETN установлено, что ионный состав пиков RDX и HMX, а также реактант-пиков при ионизации TNT и PETN лазерным излучением существенно отличается от состава соответствующих пиков при ионизации этих же веществ бета-излучением [1]. Показано, что в одинаковых условиях, с учётом уровня шумов, количество ионов, генерируемых лазерным источником, превышает количество ионов от бета-источника в 5 раз [1].

На основании анализа зависимостей ионного тока от объёма облучаемой лазером области определены оптимальные параметры лазерного излучения для максимально эффективной ионизации TNT, RDX, HMX, PETN. Для ионизации TNT оптимальная интенсивность при фиксированной энергии лазерного импульса составляет 3×10^7 Вт/см² [2], для RDX 7×10^7 Вт/см² [3], для HMX 2.5×10^7 Вт/см² [1], для PETN 3×10^7 Вт/см² [1]. Путём измерения ионного тока в пиках указанных веществ при различных объёмах облучаемого пространства показано, что при установленной энергии в импульсе фокусировка луча позволяет получать максимальное количество ионов исследуемых веществ при достижении указанных выше интенсивностей, значения которых связаны с механизмами ионизации конкретных нитросоединений, в том числе с прямой многофотонной ионизацией. При оптимальных параметрах лазерного излучения для генераторов насыщенных паров получены пределы обнаружения: для TNT 3×10^{-15} г/см³ [4], для RDX 3×10^{-15} г/см³ [1], для PETN 8×10^{-15} г/см³ [1], для HMX менее 3×10^{-15} г/см³ [1]. Полученные пределы обнаружения в несколько раз ниже, чем в известных коммерческих детекторах взрывчатых веществ, работающих с паровой фазой.

Список литературы

1. Kostarev V.A., Kotkovskii G.E., Chistyakov A.A., Akmalov A.E. Enhancement of characteristics of field asymmetric ion mobility spectrometer with laser ionization for detection of explosives in vapor phase // *Chemosensors*. 2020. V. 8. P. 91.
2. Akmalov A.E., Chistyakov A.A., Kotkovskii G.E., Kostarev V.A. Parameters of laser ionization of explosives for ion mobility spectrometry // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10802.
3. Akmalov A.E., Chistyakov A.A., Kotkovskii G.E., Kostarev V.A. Detection of vapors of explosives by field asymmetric ion mobility spectrometry method with laser ionization // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11166.
4. Akmalov A.E., Bogdanov A.S., Chistyakov A.A., et al. A laser desorption ion-mobility increment spectrometer for detection of ultralow concentrations of nitro compounds // *Instruments and Experimental Techniques*. 2013. V. 56 (3). P. 309-316.

И.А. СТЕПАНОВ, С. ХЫДЫРОВА, Д.Д. ВАСИЛЬЕВ,
К.М. МОИСЕЕВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

РАСЧЁТ ВРЕМЕНИ ОТКЛИКА СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ОДНОФОТОННОГО ДЕТЕКТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ПЛЁНКИ $W_xSi_{(1-x)}$

Проведён расчёт времени отклика однофотонного детектора в зависимости от поверхностного сопротивления и критической температуры плёнок W_xSi_{1-x} .

I.A. STEPANOV, S. HYDYROVA, D.D. VASILIEV, K.M. MOISEEV
Bauman Moscow State Technical University

CALCULATION OF SNSPD RESPONSE TIME DEPENDING ON $W_xSi_{(1-x)}$ FILM PARAMETERS

The response time of a superconducting single-photon detector is calculated as a function of the surface resistance and critical temperature of W_xSi_{1-x} films.

Однофотонные детекторы на основе сверхпроводящей нанопроволоки (SNSPD) востребованы в ЛИДАРах, системах дальней космической связи, квантовых вычислениях и оптической томографии [1]. Чувствительный элемент детектора представляет собой меандр из нанопроволоки, сформированной на основе тонкой сверхпроводящей плёнки. Перспективным материалом чувствительного элемента является W_xSi_{1-x} , детекторы на основе которого демонстрируют эффективность до 93 % [2].

Скорость счёта SNSPD характеризуется его временем отклика τ , которое складывается из времени нарастания τ_{rise} и времени спада τ_{fall} : $\tau = \tau_{rise} + \tau_{fall}$. Времена нарастания и спада импульса определяются как $\tau_{rise} = \frac{L_K}{R_L}$ и $\tau_{fall} = \frac{L_K}{R_L + R_n}$, где R_L – шунтирующее сопротивление, равное

50 Ом, R_n – сопротивление детектора при его переходе в резистивное состояние после поглощения фотона, которое обычно составляет порядка 1 кОм [7]. Кинетическая индуктивность чувствительного элемента

детектора, ограничивающая его быстродействие: $L_K = \frac{\mu_0 l \lambda_{GL}^2}{wd}$ [3],

где μ_0 – магнитная постоянная, l – длина нанопроволоки, w – ширина нанопроволоки, d – толщина плёнки, λ_{GL} – глубина проникновения

магнитного поля. $\lambda_{GL}(T) = \lambda_{GL}(0) \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-1/2}$ [4], где T – рабочая температура, $\lambda_0 = \frac{\hbar R_s d}{\pi \mu_0 \Delta_0}$ –

глубина проникновения магнитного поля при $T = 0$ К [5], \hbar – приведённая постоянная Планка, $\Delta(0)$ – энергетическая щель при $T = 0$ К.

Поскольку энергетическую щель сверхпроводника $\Delta(0)$ согласно теории БКШ можно выразить через критическую температуру T_c : $\Delta = 1,764 \cdot k_B \cdot T_c$ [6], приведённые зависимости позволяют оценить время отклика детектора на основании параметров плёнки T_c , R_s и толщины d .

Для наших плёнок W_xSi_{1-x} , было рассчитано время отклика τ детектора на основании экспериментально определённых параметров плёнки T_c , R_s и толщины d . Проведённый расчёт для чувствительного элемента в виде меандра с шириной нанопроволоки $w = 100$ нм и общей длиной $l = 1000$ мкм демонстрирует $\tau \approx 2 \dots 4$ нс. В случае чувствительного элемента в виде параллельных полос длиной $l = 10$ мкм время отклика принимает значения $\tau \approx 20 \dots 40$ пс (рис. 1), что соизмеримо с характерными значениями для SNSPD. Наименьшее $\tau \approx 20$ пс достигается при $R_s \approx 200$ Ом, $T_c \approx 4,5$ К.

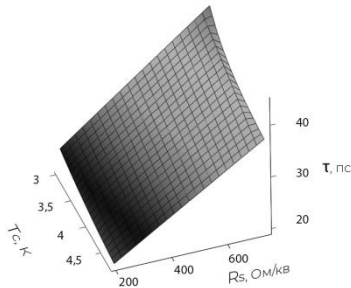


Рис. 1. Время отклика τ в зависимости от T_c и R_s плёнок W_xSi_{1-x} для нанопроволоки $w = 100$ нм и длиной $l = 10$ мкм

Список литературы

1. Shcherbatenko M., et al. // Optics Express. 2016. V. 24. № 26. P. 30474-30484.
2. Marsili F., Verma V., Stern J. et al. // Nature Photon. 2013. V. 7. P. 210-214.
3. Тархов М.А. // дисс. НИЦ "Курчатовский институт", 2015.
4. Aburto A., Fruchter L., Pasquier C. // Physica C: Superconductivity and its applications. 1998. V. 303. № 3-4. P. 185-190.
5. Zhang X., et al. // Physical Review B. 2016. V. 94. № 17. P. 174509.
6. Тинкхам М. Введение в сверхпроводимость. Рипол Классик, 1980.
7. Корнеев А.А. // дисс. на соиск. уч. степ. докт. физ.-мат. наук: 01.04.05/М. 2015.

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, Ю.А. КУЗИЩИН,
И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ,
А.П. ТКАЧУК¹, Б.И. ВЕРДИЕВ¹, А.Г. АЛАТЫРЕВ¹

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии
им. Н.Ф. Гамалеи, Москва*

ВОЗМОЖНОСТЬ ОДНОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕСКОЛЬКИХ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВОЗБУЖДАЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОТОЧНОМ ОПТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА БИОАЭРОЗОЛЕЙ

Обсуждается архитектура оптической системы и алгоритм работы системы регистрации и обработки данных, позволяющие реализовать спектральный анализ воздушного потока, содержащего биологические аэрозольные частицы, с его облучением несколькими светодиодными источниками возбуждающего излучения различного спектрального диапазона.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKIY, Yu.A. KUZISHCHIN,
I.L. MARTYNOV, E.V. OSIPOV, A.A. CHISTYAKOV,
A.P. TKACHUK¹, B.I. VERDIEV¹, A.G. ALATYREV¹

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

*¹National Research Center for Epidemiology and Microbiology
named after the honorary academician N.F. Gamaleya, Moscow*

THE ABILITY OF SIMULTANEOUSLY USING OF SEVERAL EXCITING LEDs IN REAL-TIME FLOW CYTOMETRY OF BIOAEROSOLS IN AIR

Various approaches of bioaerosol single particle detector architecture with several excitation LEDs sources are discussed.

Проточный оптический метод (ПОМ) анализа аэрозольных частиц [1 - 3] представляет собой мощный инструмент для обнаружения биопатогенов различной природы. Работа приборов на базе ПОМ основана на поштучной регистрации и классификации аэрозольных частиц путем анализа сигналов флуоресценции и рассеяния УФ-излучения. Одним из важных направлений совершенствования подобных приборов в настоящее время является использование УФ

светодиодных источников возбуждающего излучения взамен традиционных газоразрядных ламп. Компактный размер УФ-светодиодов и относительно узкая спектральная полоса излучения делает идею использования нескольких таких источников в составе одного устройства целесообразной. Использование нескольких УФ-светодиодов с различными длинами волн очевидно позволит повысить селективность детектирования биоаэрозольных частиц и расширит возможности по их классификации [4].

Целью настоящей работы являлась разработка оптимальной архитектуры оптической системы и алгоритма работы детектора биоаэрозольных частиц с двумя УФ светодиодами источниками возбуждения.

В качестве источников возбуждающего излучения с длинами волн 280 и 365 нм в работе использовались светодиоды производства компании LG Innotek. Для регистрации сигналов рассеяния и флуоресценции аэрозольных частиц использовались модули ФЭУ, работающие в режиме счёта фотонов.

Для достоверного анализа исследуемой пробы было предложено использовать её попеременное облучение двумя УФ-светодиодами. Было проанализировано и опробовано два режима переключения источников возбуждающего излучения. В первом случае частота переключения светодиодов была в несколько раз больше, чем величина обратная времени пролёта аэрозольной частицы через область оптического возбуждения, во втором случае наоборот. Сравнительный анализ показал, что второй подход значительно проще в приборной и программной реализации, но при его использовании несколько снижается селективность детектирования целевых биоаэрозолей, так как сопоставление данных для разных источников возбуждающего излучения происходит на статистическом уровне. Первый подход позволяет в максимальной степени реализовать селективный анализ аэрозольных частиц, однако возможности его реализации ограничены быстродействием конкретных светодиодных модулей.

Список литературы

1. Hill S.C., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. Elsevier. 2015. V. 157. P. 54-70.
2. Bundke U., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3, № 1. P. 263-271.
3. Khudyakov E.S., et al. // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2016. P. 30-38.
4. Sivaprakasam V., et al. // Optics Express. 2004. V. 12. № 19. P. 4457.

И.А. СТЕПАНОВ, С. ХЫДЫРОВА, Д.Д. ВАСИЛЬЕВ,
К.М. МОИСЕЕВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**РАСЧЁТ ПОРОГОВОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ
СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ОДНОФОТОННОГО
ДЕТЕКТОРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ
ПЛЁНКИ $W_xSi_{(1-x)}$**

Проведён расчёт пороговой длины волны в зависимости от поверхностного сопротивления и критической температуры плёнок W_xSi_{1-x} и выявлен диапазон значений, обеспечивающих внутреннюю эффективность детектирования IDE = 100 % для излучения с длиной волны $\lambda \geq 1550$ нм.

I.A. STEPANOV, S. HYDYROVA, D.D. VASILIEV, K.M. MOISEEV
Bauman Moscow State Technical University

**CALCULATION OF THE CUTOFF WAVELENGTH
OF SNSPD DEPENDING ON $W_xSi_{(1-x)}$ FILM PARAMETERS**

The cutoff wavelength is calculated as a function of the surface resistance and critical temperature of the W_xSi_{1-x} films. A range of values is identified that ensure the internal detection efficiency IDE = 100 % at a wavelength $\lambda \geq 1550$ nm.

Сверхпроводниковые однофотонные детекторы востребованы в системах дальней космической связи и квантовых вычислениях [1]. Перспективным является материал чувствительного элемента W_xSi_{1-x} , такие детекторы демонстрируют эффективность до 93 % [2]. Внутренняя эффективность детектирования IDE характеризует вероятность возникновения однофотонного отклика при поглощении фотона. IDE = 100 % при длине волны излучения меньше пороговой λ_c .

Пороговая длина волны рассчитывается как $\lambda_c = \frac{\hbar c}{E_{\min}}$ [3],

где E_{\min} – минимальная энергия фотона, необходимая для полного подавления сверхпроводимости в горячем пятне для плёнки толщиной d :

$$E_{\min} = d\pi L_n^2 \left(\frac{N(0)\Delta^2}{2} + \frac{\pi^2 N(0)(k_b T_c)^2}{\frac{3}{2} \left(1 + \frac{c_{ph}(T_c)}{c_e(T_c)} \right)} \right) [4].$$

Здесь $L_{th} = \sqrt{D \cdot \tau_{th}}$ – длина термализации [5], D – коэффициент диффузии электронов, для W_xSi_{1-x} $D = 0,58 \text{ см}^2/\text{с}$ [6], τ_{th} – время термализации квазичастиц, при $T \approx T_c$ τ_{th} принимается равным времени электрон-электронного взаимодействия $\tau_{ee} = \left(\frac{e^2 R_s k_b T_c}{2\pi\hbar^2} \ln \left(\frac{\pi\hbar}{e^2 R_s} \right) \right)$ [7].

Энергетическая щель Δ , плотность состояний на уровне Ферми $N(0)$, электронная и фононная теплоёмкости C_e и C_{ph} также выражаются через параметры плёнки. Выразив используемые в расчёте параметры через поверхностное сопротивление R_s , критическую температуру T_c и толщину плёнки d , мы рассчитали пороговую длину волны λ_c для наших плёнок W_xSi_{1-x} в зависимости от определённых экспериментально параметров R_s , T_c и d . Поскольку $T_c \cdot d$ связано с R_s [8], можно представить поверхность зависимости λ_c от двух параметров плёнки: T_c и R_s (рис. 1) и кривую $R_s(T_c)$, для которой $\lambda_c = 1,55 \text{ мкм}$ (рис. 2).

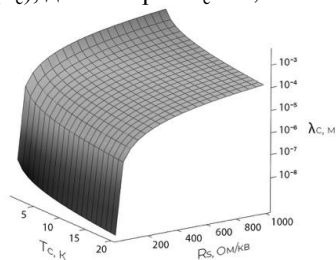


Рис. 1. Пороговая длина волны детектора в зависимости от T_c и R_s плёнок W_xSi_{1-x}

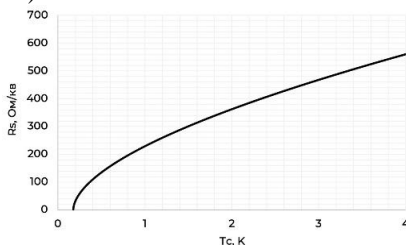


Рис. 2. График $R_s(T_c)$ плёнок W_xSi_{1-x} , при которых $\lambda_c = 1,55 \text{ мкм}$

Для W_xSi_{1-x} детектора уменьшение T_c и увеличение R_s способствует увеличению пороговой длины волны λ_c . Формирование детектора на основе плёнок W_xSi_{1-x} с R_s выше полученной кривой на рис. 2 обеспечит детектирование при требуемой длине волны излучения $\lambda > 1,55 \text{ мкм}$ с внутренней эффективностью $IDE = 100 \%$.

Список литературы

1. Henrich D. // KIT Scientific Publishing, 2013. Т. 10.
2. Marsili F., Verma V., Stern J., et al. // Nature Photon. 2013. V. 7. P. 210-214.
3. Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М. 2007.
4. Wördenweber R. // 2017. P. 508.
5. Pearlman A.J. diss. University of Rochester. 2006.
6. Vodolazov D.Y. // Physical Review Applied. 2017. V. 7. № 3. P. 034014.
7. Altshuler B.L., Aronov A.G. in Electron-electron interaction in disordered systems. 1985.
8. Ivry Y., et al. // Physical Review B. 2014. V. 90. № 21. P. 214515.

Т.Ю. МОГИЛЬНАЯ, Л.Л. ПАГАВА¹
*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)
¹МНПК «Авионика» им. О.В. Успенского, Москва*

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ВРМБ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОСЕРЕБРА И БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДНК

Исследованы спектры вторых гармоник диагностики вынужденного рассеивания Мандельштама-Бриллюэна наноструктур в коллоидных растворах.

T.Yu. MOGILNAYA, L.L. PAGAVA¹
*Moscow Aviation Institute (National Research University)
¹«Avionica» Joint Stock Company, Moscow*

INVESTIGATION OF THE SECOND HARMONIC SPECTRA OF THE VRMB OF COLLOIDAL SOLUTIONS OF NANOSILVER AND BIOLOGICAL OBJECTS CONTAINING DNA

The spectra of second harmonics for diagnostics of forced Mandelstam-Brillouin scattering of nanostructures in colloidal solutions are studied.

В работе [1] нами было показано, что при невысоких содержаниях сильно люминесцирующих примесей, в оптических спектрах наблюдаются отдельные пики, соответствующие примеси и основной лазерной моды. При увеличении концентрации и, как следствие, увеличении интенсивности люминесценции пик перемещается в антистоксовую область и с сохранением линейности логарифмической зависимости. Однако при дальнейшем увеличении концентрации в спектрах появляются несколько перекрывающихся пиков, линейность характеристик нарушается и наблюдается выкачивание энергии из основной лазерной моды.

Стоит отметить, что, перекрытие максимумов затрудняет обнаружение исследуемых объектов при высоких концентрациях, что существенно ограничивает возможности данного метода.

В данном исследовании источником возбуждающего излучения, служат полупроводниковые лазеры с длинами волны 1017 нм и 810 нм.

Излучение от этих лазеров передаётся последовательно, через оптическое волокно и изолированную кювету и далее поступает на вход анализатора спектра. Мощность лазерных источников была близка к пороговой мощности излучения ВРМБ. Вынужденная люминесценция от нанобъекта, создавала условия, при которых интенсивность общего поля в растворе становилась выше пороговой, что вызывало появление пиков в стоксовой или антистоксовой области.

Были исследованы спектры пропускания (рис. 1) пропускания серебра и исследуемого вируса в растворе воды при следующих концентрациях: серебра от 10^0 до 10^{-5} мг/л при концентрации вирусов от 10 о/мл ($1 \lg$ tds 50) до 10^7 о/мл ($7 \lg$ tds 50).

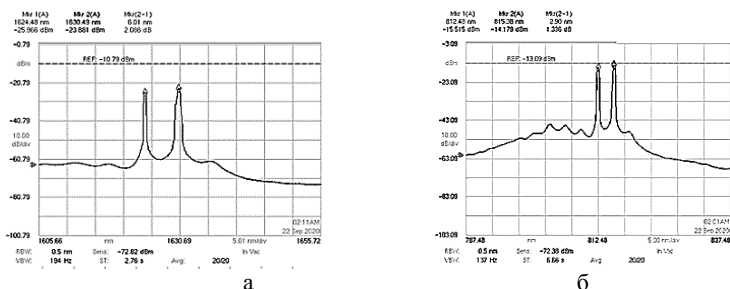


Рис. 1. Спектры первой (а) и второй (б) гармоники наносеребра при концентрации вирусов 10^2 о/мл

Если для таких смесей, как грипп, даже при невысоких концентрациях 10^2 о/мл, спектры легко диагностируются, то для средних концентраций герпеса 10^3 о/мл наблюдается перекрытие максимумов, уже для одного компонента. В этом случае расстояние между максимумами становится сравнимым с разрешающей способностью спектроанализатора. При дополнительном контроле на длине второй гармоники было обнаружено, что перекрытие спектров исчезает. Исследование спектров второй гармоники позволило увеличить расстояние между максимумами спектральных распределений стоксовой составляющей и основной лазерной модой, что может являться дополнительным информативным параметром при диагностике нанопримесей в коллоидных растворах.

Список литературы

1. Moguilnaya T., Shetrishev A. Optical express methods of monitoring of pathogens in drinking water and water-based solutions // Poisoning – From Specific Toxic Agents to Novel Rapid and Simplified Techniques for Analysis. INTECH, 2017. doi 10.5772 / intechopen.70236.

Е.М. КАСЬЯНЕНКО, А.И. ОМЕЛЬЧЕНКО

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

ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ХРЯЩЕВОЙ ТКАНИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ

Исследована временная зависимость электропроводности хрящевой ткани при лазерном нагреве импульсным периодическим излучением и в условиях естественной конвекции при комнатной температуре. Выявлены различные диапазоны немонотонного поведения температурной зависимости проводимости.

E.M. KASIANENKO, A.I. OMECHENKO

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

DEPENDENCE OF THE ELECTRIC CONDUCTIVITY OF THE CARTIAGE TISSUE ON THE TEMPERATURE DURING LASER HEATING

The time dependence of the electrical conductivity of cartilaginous tissue under laser heating by pulsed periodic radiation and under conditions of natural convection at room temperature has been investigated. Various ranges of non-monotonic behavior of the temperature dependence of conductivity are revealed.

Лечение дефектов хряща – острая проблема ортопедии; для заживления повреждённого хряща используются различные подходы, начиная от лекарственной обработки ткани и медикаментозного лечения до трансплантации донорского трансплантата и каркасов, заселённых мезенхимальными клетками [1, 2]. Хорошие результаты показывает регенерация повреждённой ткани под действием лазерного излучения [3] Для обеспечения эффективности и безопасности воздействия предпочтительно контролировать физические характеристики ткани, сохранность которых зависит от степени воздействия и момента выключения лазерного излучения.

Известно, что лазерная регенерация хряща основана на изменении упругих свойств ткани, которые определяются взаимодействием зарядов молекул хрящевого матрикса [4]. Нагрев ткани импульсно периодическим лазерным воздействием приводит к структурным изменениям и порообразованию, которые влияют на величину электрического сопротивления хряща.

Ранее в наших исследованиях была предпринята попытка анализировать электрические свойства при лазерном воздействии [5], но диапазон температур в нем не позволял вывести закономерности для донорской ткани, хранящейся при низких температурах. Целью данной работы было изучение влияния лазерного излучения на электропроводность хрящевой ткани интактного образца, выявление зависимости электропроводности от температуры и определение электрофизических параметров хрящевой ткани.

Работа проводилась на выделенной суставной хрящевой ткани быка трёх лет, импедансометрия проводилась с помощью коаксиальных электродов на постоянном токе. Облучение ткани проводилось в импульсно периодическом режиме эрбиевым волоконным лазером с длиной волны 1,56 мкм.

Анализ экспериментальных графиков выявил немонотонную зависимость электрического сопротивления от температуры нагрева. При лазерном воздействии электрическое сопротивление ткани снижается, но восстанавливается во время пауз между лазерными импульсами. Падение сопротивления связано с ростом концентрации носителей заряда. Это может быть описано термоактивированным законом роста концентрации носителей заряда. Зависимость электропроводности хрящевой суставной ткани от температуры можно разделить на четыре диапазона: 1 – немонотонная аррениусовская температурная зависимость до температуры 10 °С, 2 – линейная зависимость от 10 до 0 °С, 3 – фазовый переход ткани в замороженное состояние не обнаруживает явной температурной зависимости электропроводности, 4 – от -2 до -7 °С демонстрирует линейную зависимость сопротивления от температуры.

Измерение электропроводности с помощью постоянного тока позволяет контролировать состояние свободных зарядов, их подвижность и концентрацию в матриксе хрящевой ткани.

Список литературы

1. Gracitelli G.C., Moraes V.Y., et al. // Cochrane Database of Systematic Reviews. 2016. V. 9.
2. He Z., Wang B., Hu C., et al. // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2017. V. 154. P. 33.
3. Baum O.I., Omel'chenko A.I., et al. // Quantum Electronics. 2017. V. 47(10). P. 935.
4. Sobol E.N., Baum O.I., et al. // J. Biomed. Opt. 2011. V. 16(8).
5. Kasianenko E.M., Omelchenko A.I., Sobol E.N. // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. 2016. V. 80(4). P. 463.

А.Г. ПУТИЛОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАНТОВО-КАСКАДНОГО ЛАЗЕРА СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Приведены исследования пространственно-временных и энергетических характеристик излучения квантово-каскадного лазера среднего ИК-диапазона. Рассмотрена возможность спектрального суммирования отдельных квантово-каскадных лазеров.

A.G. PUTILOV

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

RESEARCH OF THE GENERATION CHARACTERISTICS OF A QUANTUM-CASCADE LASER OF THE MID-IR RANGE

Investigations of the spatial-temporal and energy characteristics of radiation from a quantum-cascade laser in the mid-IR range are presented. The possibility of spectral summation of individual quantum-cascade lasers is considered.

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ), представляют собой полупроводниковые лазеры среднего (2 - 28 мкм) и дальнего (60 - 300 мкм) ИК, в том числе терагерцевого, диапазонов спектра [1].

ККЛ являются компактными и высокоэффективными лазерами (КПД преобразования накачки может быть более 10 %) с относительно высокой мощностью излучения. Внешний вид излучающего торца ККЛ представлен на рис. 1. На сегодняшний день разработаны ККЛ работающие в непрерывном или импульсно-периодических режимах.

Лазеры данного типа нашли ряд применений в многочисленных приложениях современной науки и техники. В частности ККЛ используются в таких областях как спектроскопия, газоанализ, медицина, гетеродинирование, интроскопия материалов и т.д., а также в ряде специальных применений

Особый интерес представляет излучение ККЛ спектрального диапазона 7 - 8 мкм в частности, используемое для анализа выдыхаемого воздуха и в лазерной хирургии [2].

В данной работе представлены результаты исследования генерационных характеристик отечественного ККЛ [3]. Длина волны излучения ККЛ ~ 8 мкм. Импульсная мощность излучения превышает 1 Вт. Рассмотрена возможность спектрального сложения излучения ККЛ для увеличения суммарной мощности. Оптическая схема спектрального сложения представлена на рис. 2.

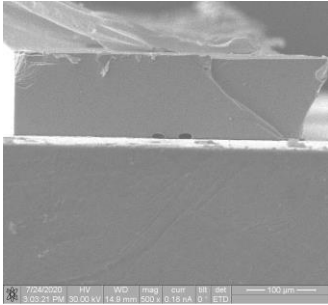


Рис. 1. РЭМ изображение ККЛ напаянного на теплообменник

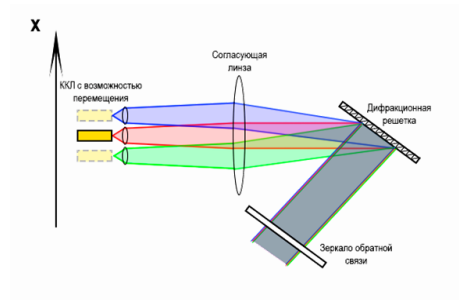


Рис. 2. Схема проверки спектрального сложения отдельных ККЛ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-20086 и частично № 19-29-10022.

Список литературы

1. Pecharroman-Gallego R. An Overview on Quantum Cascade Lasers: Origins and Development. DOI: 10.5772/65003.
2. Caffey D., Radunsky M., Cook V., et al. Recent results from broadly tunable external cavity quantum cascade lasers // Novel In-Plane Semiconductor Lasers X. 2011. V. 7953. P. 79531K.
3. Dudelev V.V., et al. High-power (> 1 W) room-temperature quantum-cascade lasers for the long-wavelength IR region // Quantum Electronics. 2020. V. 50 (2). P. 141.

Д.И. КОРМАШОВА, Д.А. ЗАЗЫМКИНА, А.А. ИОНИН,
И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ, А.Ю. КОЗЛОВ,
А.А. КОТКОВ, Ж.-Ф. ЛАМПИН¹, Ю.А. МИТЯГИН,
С.А. САВИНОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН

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

¹Институт электроники, микроэлектроники и нанотехнологии, Лилль, Франция

ДИНАМИКА ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО NH₃-ЛАЗЕРА ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКЕ ИЗЛУЧЕНИЕМ CO₂-ЛАЗЕРА

Измерены с наносекундным разрешением терагерцовые импульсы NH₃ лазера и «длинные» (~ 100 мкс) импульсы электроионизационного CO₂ лазера оптической накачки.

D.I. KORMASHOVA, D.A. ZAZYMKINA, A.A. IONIN,
I.O. KINYAEVSKY, Yu.M. KLIMACHEV, A.Yu. KOZLOV,
A.A. KOTKOV, J.-F. LAMPIN¹, Yu.A. MITYAGIN, S.A. SAVINOV,
A.M. SAGITOVA, D.V. SINITSYN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology, Lille, France

DYNAMICS OF TERAHERTZ NH₃ LASER GENERATION AT OPTICAL PUMPING CO₂ LASER

Terahertz pulses of NH₃ laser radiation and “long” (~ 100 μs) pulses of an EBSD CO₂ laser, used for optical pumping, were measured with a nanosecond resolution.

Для решения широкого круга задач (например, дистанционного детектирования взрывчатых веществ за препятствиями [1], и др.) представляют интерес лазерные источники терагерцового диапазона. Одним из наиболее хорошо изученных газовых лазеров такого типа является NH₃-лазер. Динамика генерации NH₃-лазера исследовались либо при короткой длительности накачки (~ 100 нс) [2, 3], либо при временном разрешении не лучше ~ 20 нс и длительности накачки до ~ 3 мкс [4]. Нами были измерены с наносекундным разрешением импульсы излучения NH₃ лазера и электроионизационного (ЭИ) CO₂ лазера с длительностью генерации до ~ 100 мкс, использованного для оптической накачки.

Ячейка с NH₃ имела длину 20 см с окном из ВаF₂ для ввода излучения накачки с одной стороны и окном из лавсана для вывода терагерцового

излучения с другой. Внутри располагались два плоских латунных зеркала на расстоянии 12 см с отверстиями 2 мм на оси кюветы, через которые осуществлялись ввод и вывод излучения. Излучение CO_2 -лазера и ИК-излучение NH_3 -лазера отсекались кристаллическим кварцем. Импульс NH_3 -лазера измерялся болометром RS 0.4 - 4 T (ЗАО "Сконтел", разрешение ~ 1 нс), а CO_2 -лазера – фотодиодом PEM-L-3 (разрешение ~ 0.5 нс). На рис. 1 представлены зависимости длительности и задержки начала генерации относительно начала импульса накачки импульсов NH_3 -лазера от энергии импульса CO_2 -лазера для линий 9R(16) (рис. 1а) и 9R(30) (рис. 1б). Задержка начала генерации NH_3 -лазера составила $\sim 0.3 - 2.5$ мкс для линии 9R(16) и $\sim 0.2 - 0.6$ мкс для линии 9R(30). Длительность генерации NH_3 -лазера в зависимости от энергии импульса CO_2 -лазера лежала в диапазоне от 10 до 25 мкс и от 25 до 40 мкс для линий 9R(16) и 9R(30), соответственно.

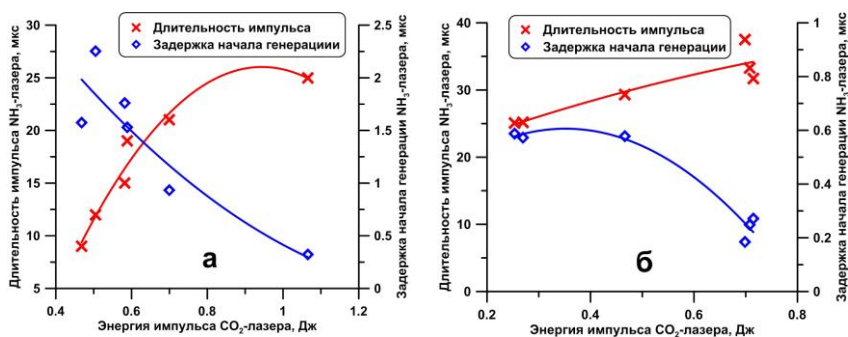


Рис. 1. Длительности и задержки начала генерации импульса NH_3 -лазера от энергии CO_2 -лазера для линий накачки 9R(16) (а) и 9R(30) (б)

Для измерения длины волны ТГц излучения была использована решётка 6 штр./мм с углом блеска 12° . Удалось зафиксировать только одну линию генерации с длиной волны $83,5 \pm 1,7$ мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-52-16019).

Список литературы

1. Federici J.F., Gary D., Barat R., et al. Detection of explosives by terahertz imaging in Counterterrorist detection techniques of explosives, // Elsevier Science B.V. 2007. P. 323-366.
2. Hirose H., Kon S. // IEEE J. of Quant. Elect. 1986. V. 22. P. 1600.
3. Wilson T.E. // International J. of Infrared and Millimeter waves. 1993. V. 14. P. 303.
4. Woskoboinkow P., Machuzak J., Mulligan W. // IEEE J. of Quant. Electr. 1985. V. 21. P. 14.

А.А. АНТИПОВ

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

МНОГОПРОФИЛЬНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР БЛИЖНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Представлен разработанный и созданный лабораторный макет перестраиваемого твердотельного лазера. Приведены результаты экспериментальных исследований энергетических параметров в зависимости от режима работы лазера и частоты генерации излучения. Продемонстрирована плавная перестройка основной длины волны лазерного излучения в диапазоне 735 - 770 нм.

A.A. ANTIPOV

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

MULTIDISCIPLINARY TUNABLE SOLID-STATE LASER NIR

The developed and created laboratory model of a tunable solid-state laser is presented. The results of experimental studies of the energy parameters depending on the laser operating mode and the radiation generation frequency are presented. A smooth tuning of the fundamental wavelength of laser radiation in the range of 735 - 770 nm is demonstrated.

Современное развитие аддитивных, обрабатывающих медицинских технологий требует применения новых источников лазерного излучения со специальными свойствами. Помимо мощности, расходимости лазерного излучения особым свойством является возможность лазера плавно перестраиваться в широком диапазоне спектра как ближнем, так и дальнем без применения специальных методов. Данными свойствами обладают так называемые вибронные кристаллы – Ti:Sa, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF, Cr:BeAlO, Cr:MgSiO и др [1].

Одним из перспективных материалов является кристалл синтетического александрита, который в качестве активного элемента делает возможным создание перестраиваемого лазера в диапазоне 700 - 850 нм [2, 3]. Широкий спектр поглощения кристалла обуславливает применение в качестве источников оптической накачки, как импульсных ксеноновых ламп, так и лазерных диодов.

Основной целью работы является создание и экспериментальное исследование энергетических параметров лазерного излучения в зависимости от частоты генерации лазерного излучения и плавной перестройки длины волны лазерного излучения. Плавная перестройка основной длины волны осуществляется с применением дисперсионного резонатора, в котором помещён двулучепреломляющий фильтр. Принципиальная схема и зарегистрированные энергетические параметры представлена на рис. 1 и 2.

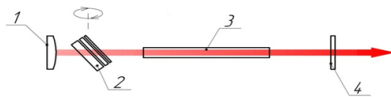


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема твердотельного лазера:
1 - глухое зеркало, 2 - двулучепреломляющий фильтр, 3 - активный элемент,
4 - полупрозрачное зеркало

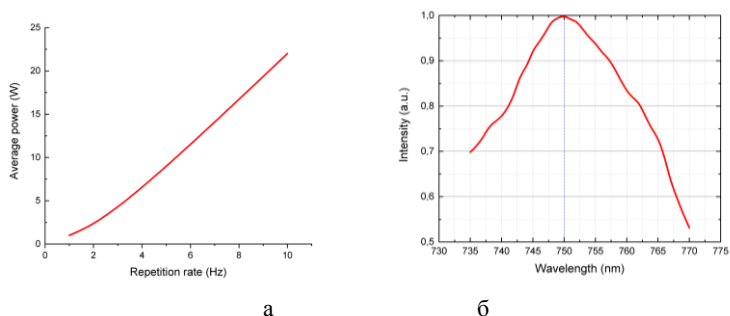


Рис. 2. Средняя мощность генерируемого лазерного излучения в зависимости от частоты (а); перестройка основной длины волны (б)

Данная лазерная система может найти своё применение в отработке аддитивных технологий при обработке высокоотражающих материалов, а также медицинских приложениях МРТ [3, 4].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-10022, частично в рамках проектов РФФИ № 20-02-00515 и № 20-32-90052.

Список литературы

1. Sennaroglu A. // Quantum Electron. 2002. V. 26. P. 287.
2. Loiko P., Ghanbari S., et al. // Opt. Mater. Express. 2018.V.8., P.3000.
3. Antipov A.A., Putilov A.G., et al. // Bul. of the Rus. Acad. of Scien.: Phys. 2020. V. 84(11). P. 1359.
4. Putilov A., Antipov A., et al. // EPJ Web Conf. 2019.V. 220.

Р.А. ШАХОВОЙ^{1,2,3}, А.С. ТУМАЧЕК², Н.М. АНДРОНОВА²,
Ю.Б. МИРОНОВ², Ю.В. КУРОЧКИН^{1,3,4}

¹ООО «QRate», Москва

²Московский технический университет связи и информатики

³Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

⁴Российский квантовый центр, Москва

АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗОВОЙ ДИФФУЗИИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРА, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ УСИЛЕНИЯ

Проанализирована система дифференциальных уравнений, моделирующая лазер, работающий в режиме переключения усиления. Определены условия, которые позволяют управлять диффузией фазы между импульсами, что может иметь практическое значение для оптических квантовых генераторов случайных чисел. Определён характер зависимости фазовой диффузии от тока смещения и тока модуляции.

R.A. SHAKHOVOY^{1,2}, A.S. TUMACHEK², N.M. ANDRONOVA²,
Yu.B. MIRONOV², Yu.V. KUROCHKIN^{1,3,4}

¹JCS «QRate», Skolkovo, Moscow region

²Moscow Technical University of Communications and Informatics

³National University of Science and Technology MISiS, Moscow

⁴Russian Quantum Center, Skolkovo, Moscow region

ANALYZING THE DEPENDENCE OF PHASE DIFFUSION ON THE PARAMETERS OF A LASER OPERATING IN THE GAIN SWITCHING MODE

A system of differential equations simulating laser operation in the gain switching mode is analyzed. Conditions were established that allow influencing the phase diffusion between pulses, which may be of practical significance for optical quantum random number generators. The nature of the phase diffusion dependence on the bias current and modulation current is determined.

Фазовая случайность между импульсами полупроводникового лазера, работающего в режиме переключения усиления, является важным компонентом квантовых генераторов случайных чисел (КГСЧ). В настоящей работе для анализа фазовой диффузии в полупроводниковом лазере, работающем в режиме переключения усиления, использовалась система дифференциальных уравнений с ланжевеновскими членами [1-3],

переформулированная в рамках теории стохастического исчисления Ито [4]. С использованием этого подхода была проведена симуляция фазовой диффузии между соседними импульсами лазера, работающего в режиме переключения усиления, для различных значений частоты импульсов тока накачки. На каждой частоте полагалось, что ток накачки имеет форму прямоугольных импульсов $I(t) = I_b + I_p(t)$, где I_b – ток смещения, а $I_p(t)$ – модуляционный ток. На рис. 1 показана зависимость дисперсии фазы от тока смещения при различных значениях частоты тока накачки.

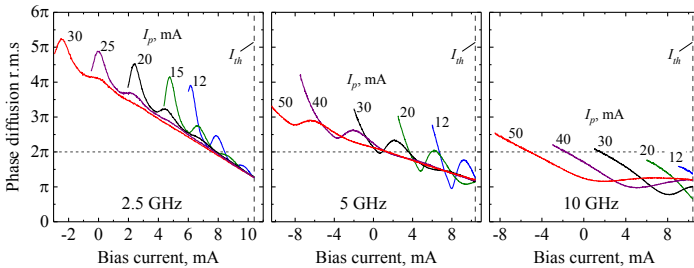


Рис. 1. Стандартное отклонение фазовой диффузии как функция тока смещения при различных значениях размаха колебания модуляционного тока и различных частотах следования импульсов, вертикальные пунктирные линии соответствуют пороговому значению тока

Можно видеть, что стандартное отклонение фазовой диффузии выше для меньших значений тока смещения. Это отражает тот факт, что число носителей уменьшается быстрее при меньшем токе накачки между лазерными импульсами, что приводит к более быстрому уменьшению напряжённости поля внутри резонатора лазера и, следовательно, к более быстрой декогеренции за счёт спонтанного излучения. Интересной особенностью здесь является немонотонное поведение кривых, которое демонстрирует своего рода «затухающие колебания» (рис. 1). Благодаря этим колебаниям фазовая диффузия при заданном токе смещения более эффективна при использовании меньшего значения размаха колебания тока. Это интересный результат, который может иметь большое практическое значение, в частности, в контексте оптических КГСЧ.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 17-71-20146.

Список литературы

1. Petermann K. Laser diode modulation and noise. Kluwer Academic Publishers. 2015.
2. Henry C. // IEEE J. Quantum. Elect. 1982. V. 18 (2). P. 259-264.
3. Henry C. // J. Lightwave Technol. 1986. V. 4 (3). P. 298-311.
4. Kloeden P.E., Platen E. Numerical solution of stochastic differential equations. Springer, 1995.

А.Е. ШЕПЕЛЕВ

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

УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ

Обоснована необходимость функционального совершенствования твердотельных лазеров в части повышения эффективности их практического использования. Предложен и реализован способ перспективного применения лазеров в технологических целях, основанный на функциональном разделении воздействующих лазерных импульсов миллисекундной длительности. Представлены результаты экспериментальной апробации предложенного способа на базе твердотельного технологического лазера.

A.E. SHEPELEV

*Institute on Laser and Information Technologies of RAS – Branch of FSRC
“Crystallography and Photonics” of RAS, Shatura*

THE CONTROL OF PULSES TEMPORAL SHAPE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF THE FUNCTIONAL USE OF SOLID STATE LASERS

The necessity of solid-state lasers functional improvement in terms of increasing the efficiency of their practical use is substantiated. A method for the prospective application of lasers for technological purposes is proposed and implemented, based on the functional separation of the acting laser pulses of millisecond duration. The results of experimental testing of this method on the basis of a solid-state technological laser are presented.

Широкая область применения и использования твердотельных лазеров определяет различные требования к параметрам и характеристикам генерируемого излучения [1]. При этом потенциальные возможности применения данного типа лазеров раскрыты не полностью [2].

Например, в случае глубокого проплавления эффективность применения лазерной технологии определяется с одной стороны параметрами излучения, с другой – оптимизацией режимов воздействия. Это обусловлено тем, что при формировании отверстия в материале в

канале проплавления накапливается расплав, который поглощает и расфокусирует излучение, что замедляет процесс лазерной перфорации, может привести к ухудшению качества формируемого отверстия и к образованию его конусности. Таким образом, для повышения эффективности лазерной перфорации материалов необходимо увеличивать скорость удаления расплава из канала проплавления [3].

Основным процессом, обеспечивающим скоростной вынос расплава из зоны лазерного воздействия, является действие давления отдачи пара. Таким образом, оптимальным является режим, при котором для интенсификации роста давления отдачи пара и увеличения скорости удаления расплава достаточно плотности мощности воздействующего импульса [4]. В этом случае перспективным оказывается подход, основанный на функциональном разделении действия лазерного импульса путем перераспределения его интенсивности по временному профилю. В этом случае лазерный импульс представляет собой совокупность длинного высокоэнергетического и короткого высокоомощного импульсов. Длинный высокоэнергетический импульс выполняет функцию плавления материала и формирует ванну расплава. Короткий высокоомощный импульс эффективно удаляет расплав путем интенсификации давления отдачи паров [4, 5].

Результаты экспериментальных исследований эффективности лазерной обработки конструкционных материалов показали, что воздействие импульсами со сложной временной формой позволяют более чем в пять раз сократить время лазерного сверления сквозных отверстий в исследуемых образцах [5].

Исследование выполнено частично при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-29-10022.

Список литературы

1. Basiev T.T., Gavrilov A.V., Osiko V.V., Smetanin S.N., Fedin A.V. // Quantum Electronics. 2007. V. 37 (1).
2. Garnov S.V., Konov V.I. Kononenko T.V., Pashinin V.P., Sinyavsky M.N. // Laser Physics. 2004. V. 14 (6).
3. Солохин С.А., Шепелев А.Е., Скрыбин Ю.М., Шилов И.В. // Научно-технический журнал «Вопросы оборонной техники». Серия 16. 2017. № 9-10. С. 37-41.
4. Солохин С.А., Шепелев А.Е., Пегасина А.В. Обработка конструкционных материалов профилированными импульсами тандемного твердотельного лазера // Сборник докладов Девятой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 320-322.
5. Пегасина А.В., Чунаев А.А., Шепелев А.Е., Солохин С.А. Тандемный технологический ИАГ:Nd-лазер // XIV Всероссийский молодежный Самарский конкурсно-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник трудов конференции. М.: ФГБУН Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, 2016. С. 380-386.

О.М. ВОХНИК¹, П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}, Р.Т. КУБАНОВ¹

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

²*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва*

ОПТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАТОР, ВОЗБУЖДАЕМЫЙ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТОЙ

На основе численного моделирования рассмотрены особенности возбуждения аналитического резонатора спектрометра слабого поглощения световым пучком с быстро изменяющейся частотой. Проанализировано взаимосвязанное влияние добротности резонатора и скорости изменения частоты на чувствительность и разрешающую способность спектрометра. Установлены факторы, приводящие к искажению формы линий поглощения.

O.M. VOKHNIK¹, P.V. KOROLENKO^{1,2}, R.T. KUBANOV¹

¹*Lomonosov Moscow State University*

²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

OPTICAL CAVITY EXCITED BY A LASER BEAM WITH VARYING FREQUENCY

On the basis of numerical simulation, the features of excitation of the analytical resonator of a weak absorption spectrometer by a light beam with a rapidly changing frequency are considered. The interrelated influence of the resonator Q-factor and the rate of frequency change on the sensitivity and resolution of the spectrometer is analyzed. The factors leading to distortion of the shape of absorption lines are established.

С целью оптимизации характеристик спектрометра слабого поглощения рассмотрено возбуждение его аналитического резонатора лазерным пучком с быстрой перестройкой частоты. Актуальность работы обусловлена тем, что спектрометры такого типа могут существенно расширить область применения лазерной спектроскопии в экологии, биомедицинских исследованиях, в системах безопасности и многих других областях. Они позволяют путем регистрации изменения интенсивности проходящего резонатор лазерного пучка записать спектр поглощения вещества, помещаемого в его полость, без использования традиционного спектрального прибора.

Анализ характеристик резонатора проводился в самом общем виде с использованием безразмерных величин в приближении плоских волн.

Фазовый набег лучей на проход считался равным $2\pi L(f_0 + \nu t)$, где частота $f_0 = 1/\lambda_0$ (L – длина резонатора, λ_0 – стартовая длина волны лазера, ν – скорость изменения частоты, t – время). Полагалось, что $2\pi Lf_0 = 2\pi N$, где N – целое большое число. В ходе расчётов скорость приращения фазы световых пучков в расчёте на проход изменялась, что соответствовало изменению скорости изменения частоты. Процедура суммирования парциальных пучков с целью определения суммарной амплитуды A выходного излучения проводилась согласно известному алгоритму [1].

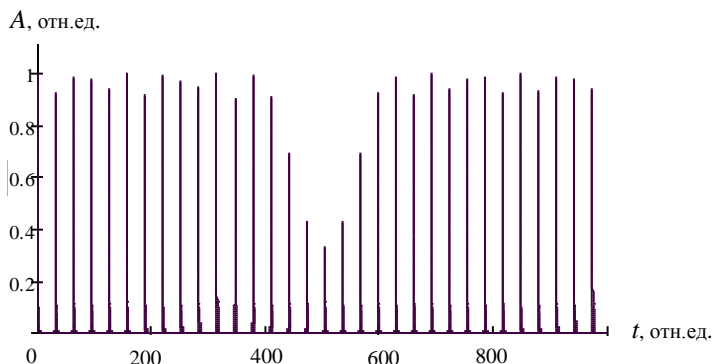


Рис. 1. Временная структура выходного излучения

Графически модуль суммарной амплитуды $A(t)$, представляющей собой последовательность резонансных пиков, представлен на рис. 1. С увеличением скорости сканирования частоты интервал между пиками уменьшается, что улучшает разрешающую способность спектрометра.

Установлено, что при достаточно высокой скорости изменения частоты лазера, когда интервал между пиками приближается к времени затухания излучения в резонаторе, контур линии поглощения начинает испытывать искажения. Наблюдаемый эффект искажения формы спектральных линий следует учитывать при выборе скорости сканирования частоты задающего лазера. Дополнительно выполненный расчёт влияния ширины линии излучения лазера показал, что с её увеличением разрешающая способность спектрометра снижается.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 19-02-00540/19).

Список литературы

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.

И.Ю. БЛИНОВ, В.И. ПАВЛОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕРМОРЕФРАКТИВНЫХ ШУМОВ В УСТАНОВКЕ
С ОПТИЧЕСКИМИ МИКРОРЕЗОНАТОРАМИ**

Приведены результаты математического моделирования терморелрактивного шума в оптических микрорезонаторах и элементах связи с помощью методов конечных элементов. Также предложены метод оптимизации конструкции установки оптических микрорезонатора для снижения уровня шумов.

I.Yu. BLINOV, V.I. PAVLOV, N.P. KHATYREV

*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements,
Mendeleevo, Moscow region*

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THERMOREFRACTIVE
NOISES IN AN INSTALLATION WITH OPTICAL
MICROSONATORS**

The results of mathematical modeling of thermorefractive noise in optical microcavities and coupling elements using finite element methods are presented. A method is also proposed for optimizing the design of an optical microcavity setup to reduce the noise level.

Стабильные узкополосные лазеры имеют большое значение для многих приложений в науке и технологиях, таких как метрология, спектроскопия высокого разрешения и атомные часы. Однако ширина линии излучения таких лазеров слишком велика для многих приложений. Диодные лазеры обладают рядом преимуществ, такими как малый размер, высокая мощность излучения и доступность. Поэтому важной задачей является исследования методов сужения их спектральной линии и изучение влияния различных шумов на работу оптических устройств, использующих диодные лазеры. Одним из методов стабилизации и сужения ширины спектра излучения лазера является привязка к высокочастотному резонатору. Простым и эффективным способом привязки является затягивание с использованием микрорезонатора с модами “шепчущей галереи” [1, 2]. В работе [3] было показано, что

эффективность затягивания зависит от шумов в элементе связи с микрорезонатором.

Целью работы является теоретическое исследование фундаментальных шумов и поиск способов их подавления. Для достижения этого была составлена математическая модель установки с микрорезонатором в реальном масштабе, используя флуктуационно-диссипативную теорему и метод конечных элементов. На рис. 1 представлена схема теоретической модели. При моделировании была использована кварцевая призма с ребром 5 мм. В качестве материала микрорезонатора был выбран фторид магния. Однако разработанные модели могут быть применимы для расчёта шумов в элементах связи из других материалов и с другими геометрическими размерами.

На рис. 2 приведены результаты расчётов терморефрактивного шума в элементе связи с микрорезонатором. Было проведено сравнение с терморефрактивным шумом в микрорезонаторе и показано, что шум микрорезонатора превосходит шум в элементе связи.

Также было показано, что использование криостата приводит к снижению терморефрактивного шума, связанного с зависимостью терморефрактивного коэффициента от температуры внешней среды.

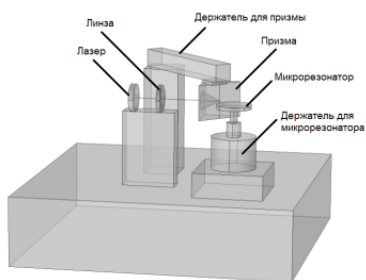


Рис. 1. Пространственная конфигурация элементов, использованная для анализа в математической модели

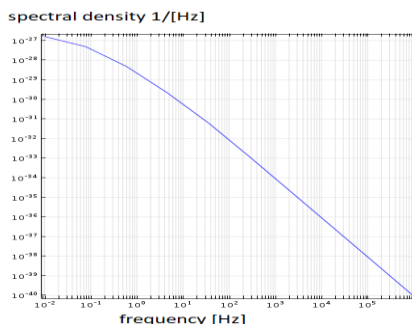


Рис. 2. Расчёт спектральной плотности шумов в элементе связи

Список литературы

1. Schwefel H.G.L., Lu Z.H., Svitlov S., Wang L.J. // Opt. Lett. 2010. V. 35. P. 2870-2872.
2. Ilchenko V.S., Liang W., Savchenkov A.A., Matsko A.B. // Proc. SPIE. 2011. V. 7913.
3. Kondratiev N.M., Lobanov V.E., Gorodetsky M.L. // Optics Express. 2017. V. 28167.
4. Kondratiev N.M., Gorodetsky M.L. // Physics Letters A. 2018. P. 2265-2268.

К.О. ВОРОПАЕВ, И.О. ЖУМАЕВА, А.С. ИОНОВ
АО «ОКБ-Планета», Великий Новгород

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА
ВЕРТИКАЛЬНО ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ 1,31 мкм
С РАЗЛИЧНЫМИ РАЗМЕРАМИ АПЕРТУР**

В данной работе приведены результаты исследования спектров вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) 1,31 мкм. Исходная структура исследуемых ВИЛ получена в системе материалов InP/GaAs, а также твёрдых растворов на их основе при помощи молекулярно-пучковой эпитаксии и прямого спекания пластин. Получены кристаллы с пятью различными диаметрами апертур. Проведены исследования спектров и представлены основные результаты измерений.

K.O. VOROPAEV, I.O. ZHUMAEVA, A.S. IONOV
OKB-Planeta PLC, Veliky Novgorod

**RESEARCH OF VCSELS 1.31 μm SPECTRA
WITH DIFFERENT APERTURE SIZES**

This paper presents the results of a research of the emission spectra of VCSEL 1.31 μm . The initial heterostructure of the VCSELS based in a semiconductor system of InP / GaAs materials and solid solutions based on them using molecular beam epitaxy and direct wafer bonding. Crystals with five different aperture diameters were obtained. For characterization of spectra was used probe methods. The main measurement results are presented.

Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур широко используются в приёмо-передающих устройствах оптоволоконных систем связи, газовых датчиках, устройствах ввода-вывода на оптических принципах.

Целью работы является проведение сравнительного анализа спектров излучения кристаллов вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) с длиной волны генерации 1,31 мкм, имеющих различный диаметр апертуры.

В рамках работы были получены пять типов образцов ВИЛ 1,31 мкм на основе гетероструктуры базирующейся на полупроводниковых соединениях InP/GaAs. Исходная структура получена при помощи методов молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и последующего прямого спекания пластин. Диаметр апертур сформированных лазеров составлял: 4 мкм, 5 мкм, 6 мкм, 7 мкм, 8 мкм. Образцы кристаллов

формировались на одной пластине в едином технологическом цикле. На рис. 1 представлено сечение кристалла исследуемых ВИЛ.

Для формирования апертury в исследуемых ВИЛ 1,31 мкм была применена концепция зарощенного туннельного перехода (ЗТП). В слоях туннельного перехода путем травления n^{++} -InGaAs слоя и частичного травления p^{++} -InGaAs слоя формировался поверхностный рельеф в виде мезаструктуры, после чего выполнялось эпитаксиальное зарощивание верхним внутрирезонаторным контактным слоем n -InP.

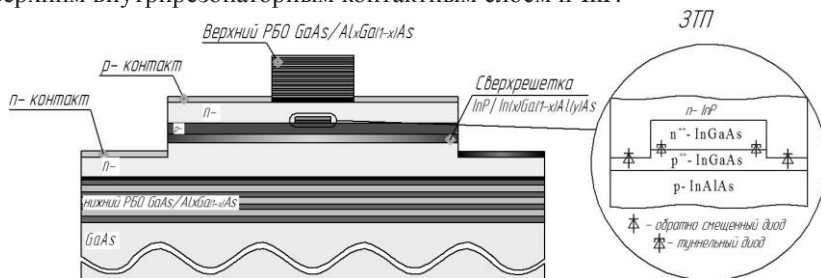


Рис. 1. Сечение кристалла ВИЛ 1,31 мкм

Исследование параметров кристаллов ВИЛ 1,31 мкм осуществлялось при помощи зондовых измерений при нормальных климатических условиях. Для характеристики спектров применялся оптический анализатор спектра Anritsu MS9740A. Все исследуемые лазеры имели пороговый ток на уровне 1 - 1,5 мА. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерений

Диаметр апертury, мкм	Длина волны (λ), нм	SMSR, дБ	Межмодовый интервал, нм	Токовая перестройка λ , нм/мА
4	1297	53	-	~ 0,33
5	1298	51	-	~ 0,3
6	1300	20	1,5 - 2	~ 0,24
7	1300	3	1 - 1,5	~ 0,2
8	1300	2	1,3 - 1,5	~ 0,16

В результате проведенных экспериментов определено, что с увеличением размера апертury происходит уменьшение коэффициента подавления побочной моды (SMSR). При диаметре апертury 4 мкм и 5 мкм приборы являются одномодовыми, но с последующим увеличением латерального размера апертury происходит переход ВИЛ в многомодовый режим генерации.

А.А. ИОНИН, И.О. КИНЯЕВСКИЙ, Ю.М. КЛИМАЧЕВ,
А.Ю. КОЗЛОВ, А.А. КОТКОВ, А.М. САГИТОВА, Д.В. СИНИЦЫН
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Разработаны широкополосные лазерные системы среднего ИК-диапазона на базе молекулярных лазеров (СО- и СО₂-лазеры) и нелинейных кристаллов (ZnGeP₂, GaSe, AgGaSe₂, PbIn₆Te₁₀ и BaGa₂GeSe₆). Лазерные системы излучали сотни спектральных линий в диапазоне длин волн от 1.7 до 19.3 мкм.

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

BROADBAND MID-IR LASER SYSTEMS

Broadband mid-IR laser systems based on molecular lasers (CO and CO₂ lasers) and nonlinear crystals (ZnGeP₂, GaSe, AgGaSe₂, PbIn₆Te₁₀ and BaGa₂GeSe₆) were developed. The laser systems emitted hundreds of spectral lines in the wavelength range from 1.7 to 19.3 μm.

Разработка источников лазерного излучения среднего ИК-диапазона представляет большой интерес для решения ряда научных и прикладных задач, таких как газовый анализ, лазерная химия, разделение изотопов. Источниками такого излучения являются широко известные СО- ($\lambda = 4.8 \div 7.7$ мкм [1]) и СО₂-лазеры ($\lambda = 9.2 \div 10.8$ мкм [2]). С целью расширить и существенно обогатить спектр излучения этих лазеров мы осуществляли генерацию суммарных (ГСЧ) и разностных (ГРЧ) частот излучения этих лазеров в нелинейных кристаллах.

В первой части работы нами была создана лазерная система на базе импульсно-периодического многочастотного СО-лазера с высокочастотной (ВЧ) накачкой, работающего в режиме МДР, с внутрирезонаторным преобразованием частоты в новом нелинейном кристалле BaGa₂GeSe₆ (BGGSe). Лазерная система одновременно работала в двух спектральных диапазонах: основной полосе СО-лазера (4.9 - 6.0 мкм) и полосе его суммарных частот. Были рассмотрены различные конструкции резонатора лазера, причём в одной из них сам нелинейный кристалл использовался как выходное зеркало. Пиковая

мощность лазерных импульсов основной и суммарной частот достигала 2 кВт и 10 Вт соответственно. Использование выходных зеркал с более высоким коэффициентом отражения для основной полосы излучения СО-лазера (90 % для $\sim 4.9 - 5.9$ мкм) привело к возрастанию мощности излучения ГСЧ, увеличению числа линий (до 170) и ширины спектра (2.45 - 2.95 мкм) [3].

В дальнейшей работе удалось ещё больше расширить спектр лазерной системы за счёт генерации третьей гармоники (ГТГ) излучения СО-лазера во втором нелинейном кристалле BGGSe, расположенного вне резонатора СО-лазера. Под «генерацией третьей гармоники» здесь подразумевается ГСЧ основного излучения СО-лазера и ГСЧ, полученной в кристалле BGGSe внутрирезонаторно. Спектр ГТГ с мощностью до 0.5 Вт лежал в диапазоне длин волн 1.7 - 1.9 мкм [4].

Экспериментально исследован спектр ГСЧ излучения неселективного (многочастотного) СО-лазера, генерируемого в кристалле $ZnGeP_2$ в условиях некритичного фазового синхронизма, со спектральным разрешением 0.1 см^{-1} . Было обнаружено, что количество спектральных линий этого спектра примерно на порядок больше, чем у описанного ранее. Для молекул CO_2 экспериментально продемонстрирована возможность измерения профиля линии поглощения с помощью гребёнки суммарных частот СО-лазера [5].

Излучение в длинноволновой области мы получали путём ГРЧ при смещении излучения импульсно-периодических СО- и CO_2 -лазеров в нелинейных кристаллах $AgGaSe_2$, BGGSe и $PbIn_6Te_{10}$. Были исследованы эффективность и показатели преломления кристаллов для данного способа преобразования частоты в область $\sim 12 - 19.3$ мкм среднего ИК-диапазона. Наибольшая эффективность преобразования частоты 10^{-4} была получена для нового кристалла $PbIn_6Te_{10}$ [6].

Таким образом, была создана широкополосная гибридная лазерная система на базе СО- и CO_2 -лазеров с нелинейными кристаллами, излучающая в диапазоне длин волн от 1.7 до 19.3 мкм.

Список литературы

1. Puerta J., et al. // Applied Physics. 1979. V. 19 (4). P. 439-440.
2. Witteman W.J. The CO_2 laser. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1987.
3. Ionin A.A., et al. // Optics Letters. 2018. V. 43 (18). P. 4358-4361.
4. Ionin A.A., et al. // Optics & Laser Technology. 2019. V. 115, P. 205-209.
5. Ionin A.A., et al. // Infrar. Phys. Technol. 2019. V. 100. P. 62-66.
6. Ionin A.A., et al. // Optics Express. 2019. V. 27 (17). P. 24353-24361.

Д.И. ХУСЯИНОВ, А.М. БУРЯКОВ, Ф.А. ЗАЙНУЛЛИН,
А.В. ГОРБАТОВА, Е.Д. МИШИНА

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

**ЭМИССИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
С ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЁМНОГО СЛОИСТОГО
КРИСТАЛЛА ЧЁРНОГО ФОСФОРА**

Приведены результаты экспериментов по генерации терагерцевого (ТГц) излучения с поверхности объёмного слоистого кристалла чёрного фосфора методом ТГц спектроскопии временного разрешения. Показано, что генерируемое ТГц излучения поляризовано эллиптически, что может быть связано со спин-поляризованными фототоками.

D.I. KHUSYAINOV, A.M. BURYAKOV, F.A. ZAINULLIN,
A.V. GORBATOVA, E.D. MISHINA

MIREA - Russian Technological University, Moscow

**EMISSION OF TERAHERTZ RADIATION FROM BULK
LAYERED BLACK PHOSPHORUS**

The results of experiments on the generation of terahertz radiation from the surface of a bulk layered black phosphorus by the method of terahertz time-resolved spectroscopy are presented. It is shown that generated terahertz radiation can be associated with spin-polarized photocurrents.

Количество научных работ, посвящённых возможности использования двумерных полупроводниковых материалов (дихалькогениды переходных металлов, чёрный фосфор и др.) в качестве эмиттеров и детекторов терагерцевого (ТГц) излучения, с каждым годом увеличивается [1-3]. В одной из последних работ [4] была продемонстрирована генерация ТГц излучения в дихалькогенидах переходных металлов и показано, что механизмом генерации ТГц излучения может быть спин-поляризованные фототоки, возникающие при взаимодействии образца с фемтосекундными лазерными импульсами.

Целью данной работы являлось исследование характеристик эмиссии ТГц излучения с поверхности объёмного слоистого кристалла чёрного фосфора.

Образец был выращен методом газотранспортной реакции. Исследования эмиссионных параметров генерации проводились методом терагерцевой спектроскопии временного разрешения в геометрии на отражение. В качестве источника оптических фемтосекундных импульсов использовался лазер с частотой следования в 3 кГц и длительностью импульсов в 30 фс с длиной волны 800 нм. Угол падения оптического излучения на образец был равен 45°. Плотность энергии падающего на поверхность излучения составляла ~ 1 мДж/см². Исследование поляризационных характеристик генерируемого ТГц излучения проводилось при помощи решёточных поляризаторов. Детектирование проводилась методом нелинейно-оптической регистрации [5]. Было показано, что генерируемое ТГц излучение эллиптически поляризовано и поляризовано лево-эллиптически и право-эллиптически, в зависимости от угла поворота плоскости падающей поляризации оптической накачки. Такое поведение может говорить о влиянии спин-поляризованных фототоков на генерацию ТГц излучения в объёмном кристалле чёрного фосфора.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования РФ (Госзадание № FSFZ-0706-2020-0022) и гранта РТУ МИРЭА (НИЧ-46).

Список литературы

1. Zhang L., et al. Terahertz surface emission of d -band electrons from a layered tungsten disulfide crystal by the surface field // Phys. Rev. B. 2017. V. 96. № 15. P. 155202.
2. Gorbatova A.V., Khusyainov D.I., Buryakov A.M. Terahertz emission from a monolayer tungsten diselenide surface // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45. № 12. P. 1262-1265.
3. Huang Y., et al. Surface optical rectification from layered MoS₂ crystal by THz time-domain surface emission spectroscopy // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. № 5. P. 4956-4965.
4. Huang Y., et al. Hidden spin polarization in the centrosymmetric MoS₂ crystal revealed via elliptically polarized terahertz emission // Phys. Rev. B. 2020. V. 102. № 8. P. 85205.
5. Kovalev S.P., Kitaeva G.K. Terahertz electro-optical detection: optical phase or energy measurements // J. Opt. Soc. Am. B. 2013. V. 30. № 10. P. 2650.

С.В. САЗОНОВ^{1,2}

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

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

АВТОСОЛИТОН В УСИЛИВАЮЩЕЙ СРЕДЕ С БЫСТРОЙ ФАЗОВОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ

Получено нелинейное интегро-дифференциальное уравнение для огибающей электрического поля оптического импульса в усиливающей двухуровневой среде с быстрой фазовой релаксацией. Найдено и проанализировано его решение в виде несимметричного диссипативного солитона.

S.V. SAZONOV^{1,2}

¹*National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow*

²*Lomonosov Moscow State University*

DISSIPATIVE SOLITON IN A GAIN MEDIUM WITH THE FAST PHASE RELAXATION

A nonlinear integro-differential equation for the envelope of the electric field of an optical pulse in an amplifying two-level medium with fast phase relaxation is obtained. Its solution in the form of an asymmetric dissipative soliton is found and analyzed.

В нелинейной оптике (и физике вообще) различают консервативные и диссипативные солитоны. Первые формируются в нелинейной диспергирующей среде без необратимых потерь энергии. Сформировавшийся в такой среде солитон несёт в себя информацию об условиях на входе в среду и поэтому обладает свободными параметрами. В случае диссипативных солитонов ситуация принципиально иная. Такие солитоны формируются в средах с необратимыми потерями энергии. Следовательно, для формирования диссипативного солитона должен быть дополнительный приток энергии. Тогда взаимная компенсация данного притока и необратимых потерь в некоторых случаях может привести к формированию диссипативного солитона [1]. Такой солитон представляет собой уединённую бегущую волну, параметры которой (длительность, амплитуда, скорость) однозначно определяются параметрами среды. То есть у диссипативных солитонов нет свободных параметров. Он является аттрактором, притягивающим к себе широкий класс входных условий.

В настоящей работе исследована возможность формирования диссипативного солитона в усиливающей двухуровневой среде с

обратимой и необратимой фазовой релаксацией, характеризуемой соответственно временами T_2^* и T_2 . При этом длительность τ_p солитона удовлетворяет условию $\tau_p > \min(T_2, T_2^*)$.

В этих условиях для частоты Раби Q оптического импульса, который распространяется вдоль оси z , получено нелинейное интегро-дифференциальное уравнение, обобщающее уравнение Фишера [2]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \gamma \theta - \varepsilon \theta^2 + \sigma \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \tau^2} - 2T_2 \int_{-\infty}^{\tau} \left(\frac{\partial Q}{\partial \tau'} \right)^2 d\tau' \right). \quad (1)$$

Здесь $\theta = T_2 \int_{-\infty}^{\tau} Q^2 d\tau'$, γ – коэффициент усиления, определяемый неравновесностью инвертированной двухуровневой среды и линейными нерезонансными потерями [3], ε – параметр, характеризующий насыщение усиления, σ – коэффициент потерь, определяемый фазовой релаксацией, локальное время τ определяется выражением $\tau = t - z/v_0$.

Найденное аналитическое решение уравнения (1) имеет вид несимметричного диссипативного солитона:

$$Q = Q_m \operatorname{sech} \xi \sqrt{1 + \tanh \xi}, \quad (2)$$

где $\xi = (t - z/v)/\tau_p$, а амплитуда Q_m , длительность τ_p и скорость v солитона однозначно определяются коэффициентами уравнения (1).

Анализ показывает, что солитон (2) несимметричен по переменной ξ , что совпадает с проведёнными ранее численными экспериментами с содержащими диссипацию уравнениями Максвелла – Блоха [1]. Кроме того, для устойчивости солитона необходимо наличие линейных нерезонансных потерь.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-11-01157).

Список литературы

1. Турицын С.К., Розанов Н.Н., Яруткина И.А., Беднякова А.Е., Федоров С.В., Штырина О.В., Федорук М.П. // УФН. 2016. Т. 186. С. 713.
2. Fisher R.A. // Ann. Eugen. 1936. V. 7. P. 355.
3. Крюков П.Г., Летохов В.С. // УФН. 1969. Т. 99. С. 169.

А.И. МАЙМИСТОВ, Е.И. ЛЯШКО, С.О. ЕЛЮТИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОЛНЫЙ УГЛОВОЙ МОМЕНТ, ПЕРЕНОСИМЫЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ВОЛНОЙ ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ИЗОЛЯТОРА

Рассмотрены поверхностные волны, распространяющиеся вдоль границы раздела диэлектрика, обладающего нелинейной восприимчивостью третьего порядка и топологического изолятора. Существование поверхностной волны обусловлено нелинейностью диэлектрика. Для случаев положительной или отрицательной линейной диэлектрической проницаемости определена плотность орбитального и спинового углового момента поверхностной волны. Дискретная природа топологического числа влечёт дискретность компонент спинового углового момента. Показано, что вектор спинового углового момента имеет проекцию на нормаль к поверхности раздела, что составляет отличие от случая обычных поверхностных поляритонов или плазмон-поляритонов.

A.I. MAIMISTOV, E.I. LYASHKO, S.O. ELYUTIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

TOTAL ANGULAR MOMENTUM OF THE NONLINEAR SURFACE WAVE AT THE INTERFACE BETWEEN CONVENTIONAL AND TOPOLOGICAL INSULATOR

The surface waves propagating on the interface between a dielectric with nonlinear susceptibility of the third order and topological insulator are considered. The existence of a surface wave results from the optical nonlinearity of the dielectric. The densities of the orbital and spin angular momentum for the surface wave are determined for the dielectrics with positive or negative linear permittivity. The discrete nature of the topological number involves discreteness of the components of the spin angular momentum. It is shown that the spin angular momentum vector has a projection on the normal to the interface that is different from the case of ordinary surface polaritons or plasmon-polaritons.

Изучение распространения в конденсированных средах пучков света с фазовыми дефектами волнового фронта, появление раз за разом публикаций, посвящённых анализу углового момента электромагнитного поля, помимо решения фундаментальных проблем, обусловлены идеей передачи момента вращения от поля к материальным телам и создание оптических манипуляторов для задач нанотехнологии. В интегральной

оптике и плазмонике роль пучков играют поверхностные волны. Исследование полного углового момента поверхностных волн показало, что волны, поляризованные перпендикулярно направлению распространения (TE волны) обладают только угловым орбитальным моментом. Для случая ТМ поверхностной волны, вектор её магнитного поля лежит в плоскости раздела, распространяющейся вдоль поверхности раздела вакуума и среды с отрицательной диэлектрической проницаемостью, спиновый момент ненулевой. В случае обычных сред было показано, что спиновый угловой момент ТМ волны направлен ортогонально волновому вектору поверхностной волны и лежит в плоскости раздела сред.

Топологическому изолятору (ТИ) присущ поверхностный магнитоэлектрический эффект, который приводит к повороту векторов магнитного и электрического поля электромагнитной волны при пересечении границы раздела обычного диэлектрика и ТИ. По этой причине поверхностные волны содержат все три компонента электрического и магнитного полей. Для существования поверхностной волны, как и в случае обычных диэлектриков, необходимо чтобы одна из соприкасающихся сред обладала бы отрицательной диэлектрической проницаемостью. Такая ситуация возможна, если ТИ покрыт металлической пластинкой или полупроводником типа ПТО. Использование гиперболического метаматериала также позволяет распространение поверхностной волны. Для такого рода поверхностных волн вектор орбитального момента перпендикулярен волновому вектору, тогда как спиновый момента перпендикулярен к направлению распространения, но имеет как нормальную, так и касательную проекции, что является следствием поверхностного тока, индуцированного на границе ТИ электромагнитной поверхностной волной [1, 2].

Из-за нелинейности одной из сред происходит взаимодействие между касательными компонентами электрического поля поверхностной волны. В результате помимо волны с постоянной амплитудой возникает периодическая поверхностная волна. Компоненты полного углового момента периодически меняются вдоль границы раздела.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00921).

Список литературы

1. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. № 6. С. 795.
2. Маймистов А.И., Ляшко Е.И. // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 5. С. 578.

Д.Д. РЕШЕТНИКОВ, А.С. ЛОСЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЧИСЛА ЛАГЕРР-ГАУССОВЫХ МОД В ЗАДАЧАХ КВАНТОВОЙ ИНФОРМАТИКИ

Приведены результаты анализа оператора радиального числа лагерр-гауссовой моды. Вычислены компоненты вектора Пойнтинга лагерр-гауссовой моды в цилиндрической системе координат. Обсуждаются преимущества в использовании радиального числа по сравнению с азимутальным, определена конфигурация пучка для оптимального использования радиального числа в задачах квантовой информатики.

D.D. RESHETNIKOV, A.S. LOSEV
Saint-Petersburg State University

THE POSSIBILITY OF USING THE RADIAL NUMBER OF LAGUERRE-GAUSSIAN MODES IN PROBLEMS OF QUANTUM COMPUTER SCIENCE

We show the result of the analysis of the radial number operator of Laguerre-Gaussian modes. The components of Poynting vector of Laguerre-Gaussian modes in the circular-cylindric coordinate system were calculated. We discuss the advantages of using radial numbers over azimuthal numbers and find a beam configuration for optimal using the radial index in quantum computer science problems.

Одним из способов изменения квантового состояния света может служить квантовая память [1]. В случае дискретных переменных для кодирования состояния света, использование лагерр-гауссовых (Л-Г) мод даёт возможность перейти к векторам состояний размерности, большей двух.

Л-Г функция является решением волнового уравнения в параксиальном приближении

$$LG_{p|l}(r, \phi, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)\omega_z}} \frac{1}{\omega_z} \left(\frac{\sqrt{2}r}{\omega_z}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{\omega_z^2}\right) e^{\left(\frac{-r^2}{\omega_z^2} + i\left(\phi + \frac{kr^2}{2R_z} - (2p+|l|+1)\phi_g\right)\right)}$$

На рис. 1а приведены поперечные профили Л-Г пучка в области перетяжки для различных значений азимутального l и радиального p чисел.

В работах [2, 3] был введён оператор \hat{P}_z радиального числа Л-Г функции. Оператор \hat{P}_z является эрмитовым, следовательно, величины ρ – наблюдаемые. Данный оператор состоит из четырёх слагаемых

$$\hat{P}_z = -\frac{\omega_z^2}{8} \nabla_r^2 + \frac{iz}{k\omega_0^2} \frac{\partial}{\partial r} r - \frac{\hat{L}_z}{2} + \frac{1}{2} \left(r^2 - 1 \right),$$

и может быть преобразован к виду

$$\hat{P}_z = \hat{P}_{z=0} + \hat{Z},$$

$$\hat{P}_{z=0} = \frac{1}{2} \left(-\frac{\omega_0^2}{4} \nabla_r^2 - \hat{L}_z + \left(\frac{r}{2} - 1 \right) \right), \quad \hat{Z} = -\frac{\omega_0^2}{8} \frac{z^2}{z_R^2} \nabla_r^2 + \frac{i z}{2z_R} \frac{\partial}{\partial r} r.$$

Оператор $\hat{P}_{z=0}$ действует в области перетяжки. Первое и последнее слагаемые этого оператора связаны с изменением амплитуды и уширением пучка в области перетяжки по радиусу, а второе отвечает за набег фазы.

Проведённый численный анализ вектора Пойнтинга Л-Г мод (рис. 1б и 1в) показал, что распыливание пучка в поперечной плоскости начинает резко возрастать с ростом радиального числа ρ . При этом происходит отклонение вектора Пойнтинга на больший угол от направления распространения пучка. Требование малого уширения пучка может быть выполнено при следующей конфигурации пучка

$$z_{max} \ll z_0^2, \quad z_{max} \ll z_R \ll R_{z,z}$$

где z_{max} – максимальное по модулю значение $|z|$, при котором пучок можно считать не уширенным.

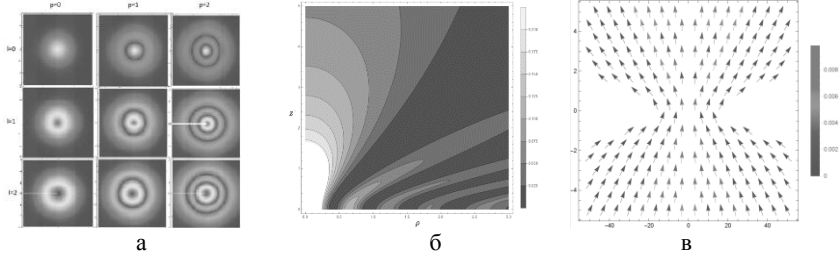


Рис. 1. Поперечный профиль Лагерр-Гауссовых пучков для различных l и ρ при $z = 0$ (а), модуль вектора Пойнтинга как функции ρ и z , при нулевом значении ϕ (б), векторный график компонент P_ρ и P_z (в)

Список литературы

1. Vashukevich E.A., Golubeva T.Yu., Golubev Yu.M. Conversion and storage of modes with orbital angular momentum in a quantum memory scheme // Phys. Rev. A. 2020. V. 101. P. 033830.
2. Plick W.N., Krenn M. Physical meaning of the radial index of Laguerre-Gauss beams // Phys. Rev. A. 2015. V. 92. P. 063841.
3. Plick W.N., Lapkiewicz R., Ramelow S., Zeilinger A. The forgotten quantum number: A short note on the radial modes of Laguerre-Gauss beams // arXiv:1306.6517 [quant-ph].

С.В. САЗОНОВ^{1,2}, Н.В. УСТИНОВ³

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

³Калининградский институт управления

ОПТИЧЕСКИЕ СОЛИТОНЫ В СИСТЕМЕ РЕЗОНАНСНО-КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРЕХОДОВ

Исследован эффект самоиндуцированной прозрачности в трёхуровневой системе с V-схемой разрешённых переходов, один из которых является резонансным, а другой – квазирезонансным. Получена новая система уравнений волнового и материальных уравнений, обобщающая систему Максвелла – Блоха. Доказана её интегрируемость и проанализированы соответствующие солитонные решения. Показано, что квазирезонансный переход оказывает влияние на профиль оптического импульса и приводит к его фазовой модуляции. Определены условия, при которых распространение солитона сопровождается полной инверсией населённостей квантовых уровней резонансного перехода. Исследовано столкновение солитонов.

S.V. SAZONOV^{1,2}, N.V. USTINOV³

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow

²Lomonosov Moscow State University

³Kaliningrad Institute of Management

OPTICAL SOLITONS IN A SYSTEM OF RESONANT-QUASIRESONANT TRANSITIONS

The effect of the self-induced transparency is investigated for a three-level system with V-scheme of the allowed transitions in the case, when one of the transitions is resonant, while another one is quasiresonant. The generalized system of the wave and material equations for the resonant transition taking into account the presence of a quasiresonant transition is derived. This system is integrable, and its soliton solutions are investigated. It is shown that quasiresonant transition has an influence on a profile of the optical soliton and leads to its phase modulation. The conditions under which the propagation of the soliton is followed by the full inversion of the populations of quantum levels of the resonant transition are established. The collision of solitons is investigated.

Для теоретического описания эффекта самоиндуцированной прозрачности (СИП) обычно используется модель двухуровневой резонансной среды, взаимодействующей с лазерными импульсами [1, 2].

На основе этого подхода была получена система волнового и материальных уравнений, получившая название уравнений СИП. Было показано, что эта система интегрируема методом обратной задачи рассеяния (МОЗР). На этом пути были получены и проанализированы её многосолитонные решения.

Дальнейшие теоретические исследования СИП развивались по многим направлениям. Одно из них связано с усовершенствованием модели двухуровневой среды или с отказом от нее. Так, был исследован двухчастотный эффект СИП в трёхуровневой среде с V-схемой разрешённых квантовых переходов. Показано, что соответствующая система волновых и материальных уравнений интегрируема при условии равенства друг другу сил осцилляторов квантовых переходов. При этом условии получены точные решения в виде двухчастотных солитонов, названных симултонами [9]. Также было предложено обобщение V-схемы разрешённых переходов в трёхуровневой среде на случай произвольного числа квантовых состояний. Там же получены решения в виде многочастотных симултонов.

Используя квазирезонансное приближение, в настоящей работе получена новая модифицированная система уравнений СИП, описывающая распространение лазерного импульса в среде из резонансно-квазирезонансных переходов. Доказана интегрируемость этой системы с помощью МОЗР, найдена соответствующая пара Лакса, построено и детально проанализировано солитонное решение. Анализ солитонного решения показывает, что влияние квазирезонансного перехода сводится, главным образом, к фазовой модуляции оптического солитона, к искажению профиля его огибающей и к изменению динамики населённостей квантовых уровней резонансного перехода. Характер фазовой модуляции солитона согласуется с явлением затягивания его в резонанс с квантовым переходом. Исследовано столкновение солитонов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-11-01157).

Список литературы

1. Lamb G.L. Jr. Elements of Soliton Theory. New York: Wiley, 1983.
2. Maimistov A.I., Basharov A.M. Nonlinear Optical Waves. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1999.
3. Konopniki M.J., Eberly J.H. // Phys. Rev. A. 1981. V. 24. P. 2567.

А.А. АКИМОВ, С.А. ГУЗАИРОВ, В.В. ИВАХНИК
*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

**КАЧЕСТВО ОБРАЩЕНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА
ПРИ ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
НА ТЕПЛОВОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ В СХЕМЕ
С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПРИ БОЛЬШИХ
КОЭФФИЦИЕНТАХ ОТРАЖЕНИЯ**

Исследована пространственная селективность четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности при наличии обратной связи по сигнальной и объектной волнам. Показано наличие корреляции между амплитудным коэффициентом отражения четырёхволнового преобразователя и полушириной пространственного спектра объектной волны при больших коэффициентах отражения.

A.A. AKIMOV, S.A. GUZAIROV, V.I. IVAKHNIK
Samara National Research University

**QUALITY PHASE CONJUGATION UNDER FOUR-WAVE
MIXING ON THERMAL NONLINEARITY IN THE SCHEME
WITH FEEDBACK AT HIGH REFLECTION COEFFICIENTS**

The spatial selectivity of a four-wave radiation converter on thermal nonlinearity has been investigated in the presence of feedback on the signal and object waves. The presence of a correlation between the amplitude reflection coefficient of a four-wave converter and the spatial spectrum half-width of the object wave has been shown at high reflection coefficients.

Использование кольцевого резонатора, реализующего обратную связь по объектной или сигнальной волнам, или по обеим волнам одновременно является одним из перспективных способов повышения эффективности четырёхволновых преобразователей излучения [1, 2]. Однако наряду с эффективностью преобразования представляет интерес анализ качества обращения волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. Одной из пространственных характеристик четырёхволнового преобразователя, определяющих качество обращения волнового фронта, является полуширина полосы пространственных частот объектной волны.

В работе исследуется влияние обратной связи на пространственную селективность четырёхволнового преобразователя излучения на тепловой нелинейности при больших коэффициентах отражения.

При вырожденном четырёхволновом взаимодействии ($\omega + \omega - \omega = \omega$) в среде с тепловой нелинейностью распространяются две волны накачки и сигнальная волна. Объектная волна получается за счёт дифракции одной из встречных волн накачки на решётке, записываемой в нелинейной среде другой волной накачки и сигнальной волной. Среда с тепловой нелинейностью располагалась внутри кольцевого резонатора, задающего обратную связь по сигнальной и объектной волнам.

Четырёхволновое взаимодействие описывается с помощью уравнения Гельмгольца, которое дополняется уравнением Пуассона. Использовались приближение заданного поля по волнам накачки и параксиальное приближение. Учитывались динамические решётки показателя преломления, связанные с интерференцией сигнальной волны с первой волной накачки и объектной волны со второй волной накачки. С учётом сделанных приближений получена система связанных дифференциальных уравнений для пространственных спектров сигнальной и объектной волн, которая анализировалась численным методом на основе многократного прохождения сигнальной и объектной волн нелинейного слоя в кольцевом резонаторе.

В случае компенсации фазового набега и равных интенсивностей волн накачки рост коэффициента отражения, как при наличии обратной связи, так и при её отсутствии приводит к монотонному уменьшению полуширины полосы пространственных частот объектной волны с ростом интенсивности первой волны накачки. Если интенсивности волн накачки не равны, то изменение полуширины полосы пространственных частот объектной волны с ростом интенсивности первой волны накачки при наличии обратной связи значительно превышает изменение полуширины в отсутствие обратной связи.

При сопряжении граней нелинейного слоя увеличение интенсивности первой волны накачки приводит вначале к увеличению, а затем к монотонному уменьшению полуширины полосы пространственных частот объектной волны.

Список литературы

1. Ивахник В.В. Обращение волнового фронта при четырёхволновом взаимодействии. Самарский университет. 2010.
2. Акимов А.А., Гузаиров С.А., Ивахник В.В. // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 4. С. 534-541.

О.Е. ЕРМАКОВ^{1,2}, А.К. САМУСЕВ¹, С.Б. ГЛЫБОВСКИЙ¹,
А.А. БОГДАНОВ¹

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА АНИЗОТРОПНЫХ РЕЗОНАНСНЫХ МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ

В работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследования и управления свойствами (дисперсией, поляризацией, фазовым и пространственным распределением, направленностью, оптическим спином) поверхностных электромагнитных волн на анизотропных резонансных метаповерхностях в оптическом, ближнем ИК и микроволновом диапазонах.

О.Ye. YERMAKOV^{1,2}, A.K. SAMUSEV¹, S.B. GLYBOVSKI¹,
A.A. BOGDANOV¹

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine*

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF SURFACE WAVES ON ANISOTROPIC RESONANT METASURFACES

This work presents the results of theoretical and experimental studies and control of the properties (dispersion, polarization, phase and spatial distribution, directivity, optical spin) of surface electromagnetic waves localized on anisotropic resonant metasurfaces in the optical, near-IR, and microwave ranges.

Метаповерхности, представляющие собой двумерный периодический массив субволновых электромагнитных рассеивателей, являются одной из ключевых платформ резонансной фотоники. Изучение и использование метаповерхностей можно условно разделить на два направления – дальнепольное и ближнепольное. В дальнем поле метаповерхности рассматриваются в качестве преобразователей плоских волн (отражатели, поглотители, линзы, антенны, поляризаторы и т.д.). Ближнепольное исследование метаповерхностей занимается эффективным управлением светом вблизи определённой поверхности или границы раздела, что имеет большое значение для элементной базы фотоники и оптоэлектроники, интегральных схем, датчиков и других планарных технологий (рис. 1). В

свою очередь, это требует гибкого управления сильно локализованными электромагнитными полями – поверхностными волнами.

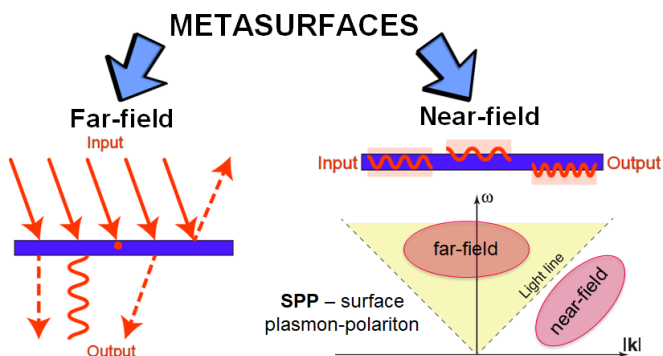


Рис. 1. Приложения метаповерхностей в дальнем и ближнем поле

Несмотря на значительный успех в контроле дисперсии и направленности поверхностных электромагнитных волн за последние 20 лет, разнообразие их режимов распространения и поляризационных состояний мало изучено. В этой работе изучены свойства анизотропных метаповерхностей, позволяющих добиться одновременного управления маршрутизацией и поляризацией поверхностных волн. А именно, с помощью развитого подхода эффективной поверхностной проводимости изучены дисперсионные особенности нового типа поверхностных волн на гиперболических метаповерхностях с множеством волновых фронтов [1, 2]. Также проведена классификация поляризационных состояний и показана возможность произвольного направления оптического спинового момента импульса этих поверхностных волн [3 - 5]. Теоретические результаты подтверждены экспериментально в оптическом [2, 6] и микроволновом [7] частотных диапазонах.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант № 20-02-00636) и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список литературы

1. Yermakov O.Y., et al. // Phys. Rev. B. 2015. V. 91(23). P. 235423.
2. Yermakov O.Y., et al. // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 14135.
3. Yermakov O.Y., et al. // Phys. Rev. B. 2016. V. 94(7). P. 075446.
4. Yermakov O.Y., et al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10227. P. 1022703.
5. Yermakov O.Y., Bogdanov A.A. // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. 2020. P. 559.
6. Samusev A., et al. // Optics Express. 2017. V. 25(26). P. 32631-32639.
7. Yermakov O.Y., et al. // Phys. Rev. B. 2018. V. 98(19). P. 195404.

К.А. ЗОЛИНА^{1,2}, Н.С. ПЕРМИНОВ^{1,3}, С.А. МОИСЕЕВ^{1,3}

¹*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ*

²*Казанский федеральный университет*

³*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ «Казанский научный центр РАН»*

КВАНТОВАЯ ПАМЯТЬ НА СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЁННЫХ АТОМОВ ЦЕЗИЯ В ФОТОННО-КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЕ С НОВОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ЭЛЕМЕНТА

Предложена модель квантовой памяти на основе системы взаимодействующих высокодобротных резонаторов, связанных с двухуровневыми атомами. Система резонаторов представляет собой шестиугольные отверстия на фотонно-кристаллической платформе с охлаждёнными атомами цезия внутри. Сделаны численные расчёты критических параметров для константы связи g между атомами и резонаторами, отвечающие обратимой динамике системы и эффективному хранению квантовой информации.

K.A. ZOLINA^{1,2}, N.S. PERMINOV^{1,3}, S.A. MOISEEV^{1,3}

¹*National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI*

²*Kazan Federal University*

³*Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of the RAS*

QUANTUM MEMORY ON THE SYSTEM OF COOLED CESIUM ATOMS IN A PHOTONIC CRYSTALLINE PLATE WITH A NEW GEOMETRY OF THE ELEMENT

A quantum memory model based on a system of interacting high-Q resonators associated with two-level atoms is proposed. The resonator system consists of hexagonal holes on a photonic crystal platform with cooled cesium atoms inside. Numerical calculations of critical parameters for the coupling constant g between atoms and resonators are made, which correspond to the reversible dynamics of the system and efficient storage of quantum information.

В работе представлена модель квантовой памяти [1] на основе системы взаимодействующих высокодобротных резонаторов, связанных с двухуровневыми атомами. Система резонаторов представляет собой шестиугольные отверстия на фотонно-кристаллической платформе с охлаждёнными атомами Cs внутри [2]. Также на охлаждённых атомах могут быть изучены необычные квантово-электродинамические эффекты,

возможность управления направлением спонтанного излучения и взаимодействия атомов друг с другом и прочее.

В работе рассматривается влияние групповой задержки на взаимодействие охлаждённых атомов в одномерном массиве из шестиугольных отверстий в пластине SiN. Для достижения этой цели были получены аналитические выражения для поля систем с двумя атомами. Необходимая для памяти и процессинга обратимая динамика поля в платформе [3] достигается для подобных многочастичных систем в точке, где вырождаются (сливаются) собственные частот (рис. 1).

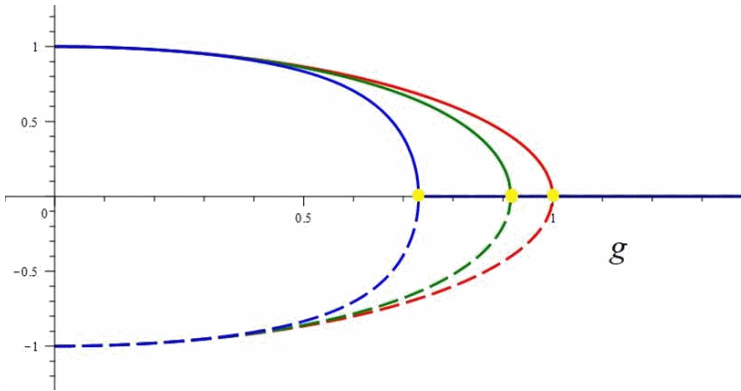


Рис. 1. Графики зависимости реальной части собственных частот гибридной системы для разных значений расстояния z между атомами ($z/g = 0; 0.1, 0.5$), видно, что точка слияний линий, отвечающая обратимой динамике системы, достигается при разных значениях константы связи g между атомом и резонатором

Список литературы

1. Moiseev S.A., et al. // Phys. Rev. A. 2017. V. 95. № 1. P. 012338.
2. Yu S.P., et al. // PNAS. 2019. V. 116. № 26. P. 12743-12751.
3. Perminov N.S., Tarankova D.Y., Moiseev S.A. // Las. Phys. 2019. V. 29. № 12. P. 124016.

Е.А. ВАШУКЕВИЧ, Т.Ю. ГОЛУБЕВА, Ю.М. ГОЛУБЕВ
Санкт-Петербургский государственный университет

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ МОД С ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ В СХЕМЕ КВАНТОВОЙ ПАМЯТИ

В работе исследуется протокол рамановской квантовой памяти на холодных атомах с Λ -конфигурацией уровней энергии для хранения и преобразования квантового света с орбитальным угловым моментом. Мы также представляем протокол высокоэффективного преобразования орбитального углового момента поля в ячейке памяти.

E.A. VASHUKEVICH, T.Yu. GOLUBEVA, Yu.M. GOLUBEV
Saint-Petersburg State University

TRANSFORMATION OF MODES WITH ORBITAL ANGULAR MOMENTUM IN QUANTUM MEMORY SCHEME

This work studies the Raman quantum memory protocol on cold atoms with Λ -configuration of energy levels for storing and transforming quantum light with orbital angular momentum. We also present a protocol for highly efficient transformation of the orbital angular momentum of a field on a memory cell.

В настоящее время разработка протоколов квантовой памяти для хранения квантовых состояний является одной из основных целей современных квантовых коммуникаций и квантовых вычислений. Многие схемы, основанные на взаимодействии света с веществом, были теоретически предложены [1, 2] и экспериментально реализованы [3]. В последние годы активно обсуждается возможность не только хранения, но и преобразования сигнала в протоколы памяти, и важным требованием к таким протоколам является эффективная запись многомодового сигнала. Создание и управление многочастичными квантовыми состояниями также требует смешивания режимов на линейных оптических устройствах. Однако при такой процедуре выходные поля оказываются смешанными с вакуумным шумом [4]. В этом контексте преобразование света в ячейке квантовой памяти позволяет линейно смешивать различные моды без дополнительного вакуумного шума.

Моды Лагерра-Гаусса, обладающие определённым орбитальным угловым моментом (ОУМ), представляют особый интерес. В отличие от состояний с определённым собственным моментом (поляризацией), ОУМ

света может принимать любые целые значения, что делает состояния с ОУМ незаменимым ресурсом для построения многочастичных запутанных состояний, являющимся основой для проведения однонаправленных квантовых вычислений.

В своей работе мы основываемся на протоколе рамановской памяти на холодных атомах, описанном в [5] и рассматриваем взаимодействие квантового и управляющего полей с холодным атомным ансамблем с лямбда-конфигурацией энергетических уровней (рис. 1). Разработанную схему можно рассматривать как протокол одномодового хранения или как протокол многомодового преобразования. Продемонстрирована возможность эффективной записи и считывания Лагерр-Гауссовых мод управляющим полем в виде плоской волны. Рассматривая одномодовый протокол, мы показываем, что эффективность хранения зависит только от оптической плотности среды, что совпадает с результатами, полученными в [6]. Мы также анализируем эффективность преобразования орбитального углового момента квантового поля в ячейке памяти. При работе в многомодовом режиме появляется ещё один существенный фактор, влияющий на эффективность протокола - интеграл перекрытия пространственных мод. Варьируя конфигурацию управляющих полей при записи и считывании, мы достигаем высокой эффективности преобразования квантовых полей.

Работа была поддержана грантами РФФИ (гранты 19-32-90059, 19-02-00204, 18-02-00648), а также грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» №20-1-5-120-1.

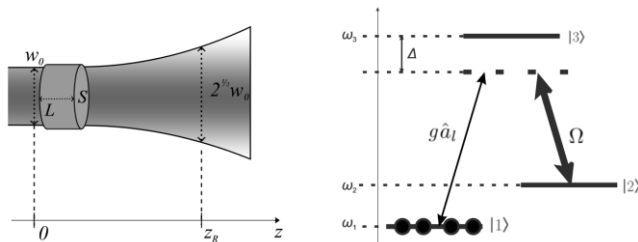


Рис. 1. Схематическое изображение рассматриваемой модели

Список литературы

1. Lukin M.D. // Reviews of Modern Physics. 2003. V. 75. № 2. P. 457.
2. Moiseev S.A., Kröll S. // Physical Review Letters. 2001. V. 87. № 17. P. 173601.
3. Appel J., et al. // Physical review letters. 2008. V. 100. № 9. P. 093602.
4. Korolev S.B., et al. // Quantum Electronics. 2018. V. 48. № 10. P. 906.
5. Golubeva T., et al. // Physical Review A. 2011. V. 83. № 5. P.053810.
6. Gorshkov A.V., et al. // Physical Review A. 2007. V. 76. № 3. P. 033805.

Н.И. ПЕТРОВ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ НА РЕЗОНАНСНОЕ ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА В ФИЛЬТРЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Исследовано влияние наночастиц, внедрённых в резонаторный слой фильтра с нарушенным полным внутренним отражением (НПВО), с учётом частотной дисперсии. Показано, что дисперсия приводит к расщеплению полосы пропускания фильтра и пространственному расщеплению падающего пучка на три разделённых по углу выходных пучка.

N.I. PETROV

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

EFFECT OF FREQUENCY DISPERSION ON THE RESONANT TRANSMISSION OF LIGHT IN THE FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION FILTER

Influence of nanoparticles embedded into a resonator layer of the frustrated total internal reflection (FTIR) filter is analyzed taking into account the frequency dispersion. It is shown that the dispersion causes splitting of the filter bandwidth and spatial splitting of incidence beam into three angularly separated output beams.

НПВО-фильтр был впервые предложен в 1947 году Лейгенсом и Тернером [1]. Это устройство, которое использует резонансное туннелирование света через плоский диэлектрический оптический волновод, зажатый между двумя тонкими плёнками с низким показателем преломления, которые действуют как потенциальные барьеры. Теория НПВО-эффекта представлена в работе [2].

В настоящей работе исследовано влияние аномальной частотной дисперсии, вызванной металлическими наночастицами, внедрёнными в резонаторный слой фильтра НПВО, на резонансное пропускание света.

Схематическая модель фильтра представлена на рис. 1. Устройство состоит из трёхслойной структуры, размещённой между двумя призмами. Хроматическая и угловая фильтрация падающего светового пучка происходит за счёт резонансного дифракционного эффекта при распространении света через неоднородную стратифицированную среду (слоистую структуру), т.е. НПВО-эффекта [3].

На рис. 2 спектральные кривые для s -поляризованного проходящего пучка света показаны для наночастиц из серебра (рис. 2а и 2b) и золота (рис. 2с и 2d). Ширины спектральных полос пропускания уменьшаются с увеличением толщины слоя с низким показателем преломления и спектральные линии с шириной $\delta\lambda = 0.013$ нм (рис. 2b) и $\delta\lambda = 0.17$ нм (рис. 2d) были получены при $d_1 = 500$ нм для слоёв из серебра и золота, соответственно. Видно, что для заданного угла падения существуют сразу три резонансные полосы. Это указывает на то, что условие резонанса в резонаторе выполняется сразу для трёх длин волн. Это свойство устройства может быть применено в системах визуализации. Заметим, что значительное уменьшение ширины спектральной линии происходит как в результате фотонных, так и плазмонных эффектов.

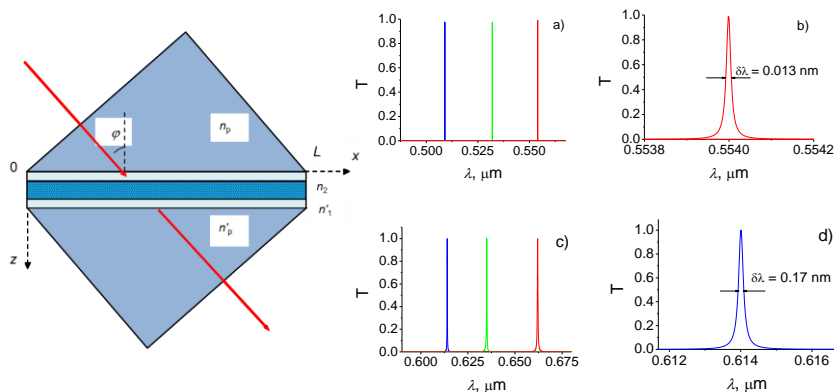


Рис. 1. НПВО-фильтр с включениями наночастиц

Рис. 2. Спектральные кривые пропускания

Рассмотренный тип тонкоплёночного фильтра может быть полезен во многих областях применения, включая область спектроскопии, сенсоры, в спектральных областях, простирающихся от УФ до дальнего ИК-диапазона [5].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Leurgens P., Turner A.F. // JOSA. 1947. V. 37. P. 983.
2. Иогансен Л.В. // ЖЭТФ. 1961. Т. 40. С. 1838-1843.
3. Petrov N.I. // Opt. Lett. 2007. V. 32. P. 2744-2746.
4. Petrov N.I., Danilov V.A., Popov V.V., Usievich B.A. // Optics Express. 2020. V. 28(5). P. 7552-7564.
5. Petrov N.I. // OSA Continuum. 2020. V. 3(9). P. 2591-2601.

М.В. САВЕЛЬЕВ, В.В. ИВАХНИК
*Самарский национальный исследовательский университет
им. акад. С.П. Королева*

ЧЕТЫРЁХВОЛНОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРЁННЫХ В ПРОЗРАЧНОЙ ЖИДКОСТИ НАНОЧАСТИЦ

Представлены результаты расчёта пространственных спектров объектной волны, возникающей в результате четырёхволнового взаимодействия, при различных концентрациях наночастиц, растворённых в прозрачной жидкости.

M.V. SAVELYEV, V.V. IVAKHNIK
Samara National Research University

FOUR-WAVE MIXING AT VARIOUS CONCENTRATION OF NANOPARTICLES DISSOLVED IN A TRANSPARENT LIQUID

The results of calculating the spatial spectra of the object wave arising as a result of four-wave mixing at various concentrations of nanoparticles dissolved in a transparent liquid are presented.

Четырёхволновые преобразователи излучения на основе сред с различными механизмами нелинейности традиционно используются в системах коррекции фазовых искажений в реальном масштабе времени. В работе [1] показано, что четырёхволновой преобразователь излучения в прозрачном коллоидном растворе с низкой концентрацией наночастиц осуществляет фильтрацию высоких пространственных частот падающей на него (сигнальной) волны, что позволяет скомпенсировать мелкомасштабные фазовые неоднородности. При этом нелинейность показателя преломления среды обусловлена в основном изменением температуры. Однако, если концентрация наночастиц, растворённых в жидкости, высока, необходимо учитывать также концентрационный механизм нелинейности [2].

Целью работы является анализ влияния концентрации наночастиц на пространственный спектр объектной волны, волновой фронт которой комплексно сопряжён волновому фронту сигнальной волны.

Рассмотрено вырожденное четырёхволновое взаимодействие в схеме со встречными плоскими волнами накачки. В приближениях заданного поля по волнам накачки и малого коэффициента отражения с учётом

равенства нулю потока частиц через грани нелинейного слоя и неизменности на них температуры получено аналитическое выражение, описывающее пространственный спектр объектной волны на передней грани \tilde{A}_4 .

Введён параметр ζ , характеризующий относительный вклад в пространственный спектр объектной волны пространственных спектров концентрационной и температурной решёток.

Для численного анализа в качестве нелинейной среды был выбран слой воды, содержащий сферические наночастицы полистирола. Сигнальная волна моделировалась волной от точечного источника, расположенного на передней грани нелинейного слоя. Считалось, что четырёхволновое взаимодействие осуществляется на длине волны 532 нм.

На рис. 1 представлены модули \tilde{A}_4 при различных значениях параметра ζ . На высоких пространственных частотах κ наблюдается выход модуля \tilde{A}_4 на постоянное значение $|\tilde{A}_{4,\max}| = |\tilde{A}_4(\kappa \rightarrow 0, 1k)|$ (где k – волновое число), пропорциональное $|\zeta - 1|$. Вблизи $\kappa \rightarrow 0$ возникает максимум модуля \tilde{A}_4 , величина которого пропорциональна ζ .

Таким образом, изменяя концентрацию наночастиц, входящую в величину параметра ζ , можно осуществлять управление размерами неоднородностей, которые будут скомпенсированы четырёхволновым преобразователем излучения в прозрачном коллоидном растворе.

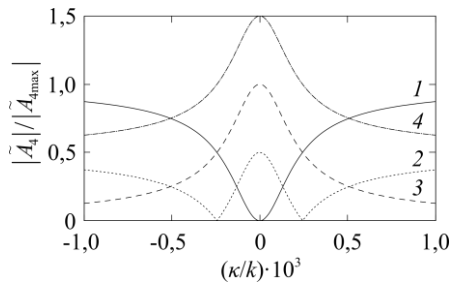


Рис. 1. Модули пространственных спектров объектной волны при толщине нелинейного слоя 1 мм, $\zeta = 0$ (1), 0,5 (2), 1 (3), 1,5 (4)

Список литературы

1. Ивахник В.В., Савельев М.В. // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 4. С. 486.
2. Ivanov V.I., Ivanova G.D., Myagotin A.V. // Proc. SPIE. 2019. V. 11024. P. 110240Y.

А.В. САЕЧНИКОВ^{1,2}, Э.А. ЧЕРНЯВСКАЯ¹, В.А. САЕЧНИКОВ¹,
А. ОСТЕНДОРФ²

¹*Белорусский государственный университет, Минск*
²*Рурский университет, Бохум, Германия*

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЦАМИ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ

Приведены результаты экспериментов по разработке, формированию и применению матриц оптических микрорезонаторов для регистрации изменений физических и химических параметров окружающего пространства. Анализируются характеристики чувствительности матриц микрорезонаторов на примере двух типов оптических структур: со сферическими стеклянными микросферами и трёхмерными полимерными тороидальными резонаторами.

A. V. SAETCHNIKOV^{1,2}, E. A. TCHERNIAVSKAIA¹,
V. A. SAETCHNIKOV¹, A. OSTENDORF²

¹*Belarusian State University, Minsk*
²*Ruhr University Bochum, Bochum, Germany*

MEASUREMENT OF PHYSICAL AND CHEMICAL PARAMETERS WITH MICRORESONATOR MATRICES

The experimental results on design, development and application of the optical microresonator matrices for detection of the variations of the physical and chemical parameters of the ambient environment are discussed. The sensitivity on the microresonator matrices is analyzed on example of the two types of the optical structures: with spherical glass microspheres and three-dimensional toroidal polymer resonators.

Методы оптического детектирования относятся к наиболее эффективным способам определения характеристик изменений физических и химических параметров исследуемого объекта. Один из интенсивно исследуемых подходов основывается на явлении резонанса мод шепчущей галереи, возникающего в кольцевых микроструктурах. Недавно предложенная методика одновременного возбуждения резонанса в нескольких микрорезонаторах с использованием оптической призмы и параллельной регистрации рассеянного излучения может выступать в качестве компромиссного варианта между сложностью построения,

чувствительностью, надежностью и доступностью сенсорных систем на основе явления оптического резонанса.

В качестве единичного сенсорного элемента для матрицы использовались стеклянные микросферы среднего диаметра 100 мкм, которые размещались на поверхности стеклянной пластинки случайным образом и фиксировались тонким слоем (< 500 нм) клеевого раствора с приведённым к воде показателем преломления и возможностью химической очистки сенсоров для многократного применения [1]. Эффективность матричного сенсора для регистрации изменений показателя преломления и осаждения молекул белка подтверждена согласованностью с аналитической моделью Лэнгмюра с ошибкой $MSE < 8 \cdot 10^4$ и пределом регистрации по показателю преломления на уровне $5 \cdot 10^{-5}$. Продемонстрирована возможность реализации доступной конфигурации на базе матричных сенсоров с использованием элементов глубокого обучения и при облучении лазером на фиксированной частоте [2]. Этот подход обеспечивает точность определения показателя преломления на уровне $3 \cdot 10^{-6}$ для динамического диапазона вариаций RIU от 0 до $2 \cdot 10^{-3}$ с временным разрешением в несколько миллисекунд.

В качестве альтернативы микросферам предложены оптические микрорезонаторы сложной структуры, изготавливаемые методом двухфотонной полимеризации из золь-гель материала SZ2080 с добротностью $4 \cdot 10^4$ [3]. Для них подтверждена способность усиления чувствительности к изменениям показателя преломления на порядок (до 500 нм на единицу показателя преломления) благодаря взаимодействию полимерной матрицы с растворёнными молекулами в водной среде.

Применимость матричного сенсора для регистрации физических параметров исследовалась для обнаружения изменения температуры и мониторинга небольших сферических полистирольных микрочастиц (< 3 мкм) [4]. Чувствительность датчика к изменениям температуры была определена на уровне 8,6 пм/С. Показана согласованность экспериментальных данных по регистрации различных концентраций микрочастиц (0.5 % и 1 %) с численной моделью, а также возможность детектирования отдельных микрочастиц при использовании метода освещения на фиксированной длине волны.

Список литературы

1. Saetchnikov A.V., et al. // IEEE Sensors Journal. 2019. V. 19 (17). P. 7644-7651.
2. Saetchnikov A.V., et al. // Opto-Electronic Advances. 2020. V. 3 (11). P. 200048.
3. Saetchnikov A.V., et al. // Journal of Lightwave Technology. 2020. V. 38 (8). P. 2530-2538.
4. Saetchnikov A.V., et al. // IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. 2020. (in press).

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, К.И. КОЗЛОВСКИЙ,
Е.М. МАКСИМОВ, А.А. ПЛЕХАНОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОБНАРУЖЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПОМОЩИ ТЕРАГЕРЦОВОГО РАДИОВИДЕНИЯ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В данной работе получены терагерцовые (ТГц) изображения (с учётом спектральной информации в каждом пикселе) при прохождении излучения через образец на основе микрокристаллов 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана, нанесённых на полиэтиленовую плёнку. В качестве источника широкополосного излучения в диапазоне от 0,5 ТГц до 2,5 ТГц использовалась фотопроводящая антенна. Спектральное разрешение обеспечивалось при помощи Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. Изображения регистрировались при помощи ТГц видеокамеры на основе микроболометрической матрицы. Продемонстрирована возможность идентификации микрокристаллов 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана при помощи цветовой визуализации спектральной информации в области частоты одного из его характеристических пиков (~ 0,8 ТГц).

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, K.I. KOZLOVSKII,
E.M. MAKSIMOV, A.A. PLEKHANOV, A.A. CHISTYAKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

DETECTION OF ORGANIC SUBSTANCES USING TERAHERTZ RADIO VISION WITH SPECTRAL RESOLUTION

In this work, terahertz (THz) images were obtained (taking into account the spectral information in each pixel) when radiation passed through a sample based on 1,3,5-trinitro-1,3,5-triazinane microcrystals deposited on a polyethylene film. A photoconductive antenna was used as a source of broadband radiation in the range from 0.5 THz to 2.5 THz. Spectral resolution was provided using a Fourier spectrometer based on a Michelson interferometer. Images were recorded using a THz video camera based on a microbolometric matrix. The possibility of identifying microcrystals of ,3,5-trinitro-1,3,5-triazinane using color visualization of spectral information in the frequency range of one of its characteristic peaks (~ 0.8 THz) has been demonstrated.

Наличие характеристических пиков поглощения и отражения в терагерцовой (ТГц) области спектра многих органических веществ [1], а также активное развитие в настоящее время ТГц технологий создают повышенный интерес к разработке методов поиска и идентификации различных химических соединений при помощи ТГц радиовидения с одновременной регистрацией спектральной информации. Результаты соответствующих исследований могут применяться при разработке современных терагерцовых систем, предназначенных для неразрушающего контроля на производстве, обеспечения общественной безопасности и т.п.

Настоящая работа посвящена исследованию обнаружения органических веществ при помощи терагерцового радиовидения со спектральным разрешением.

В используемой экспериментальной установке в качестве источника широкополосного излучения в диапазоне от 0,5 ТГц до 2,5 ТГц применяется фотопроводящая антенна, облучаемая лазерными импульсами фемтосекундной длительности. Спектральное разрешение обеспечивается при помощи Фурье-спектрометра на основе интерферометра Майкельсона. Изображения регистрируются при помощи ТГц видеокамеры на основе микроболометрической матрицы.

В данной работе получены ТГц изображения при прохождении излучения через образец на основе микрокристаллов 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана, нанесённых на полиэтиленовую плёнку, а также продемонстрирована возможность их идентификации при помощи цветовой визуализации спектральной информации в области частоты одного из характеристических пиков 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазациклогексана (~ 0,8 ТГц).

Также обсуждается использование полосовых терагерцовых фильтров для обеспечения спектрального разрешения в системах радиовидения при обнаружении органических веществ.

Список литературы

1. Palka N., Szala M. // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2016. V. 37. № 10. P. 977-992.

О.Е. ЕРМАКОВ^{1,2}, Х. ШНАЙДЕВИНД³, У. ХУБНЕР³,
Т. ВИДУВИЛТ³, М. ЦЕЙСБЕРГЕР³, А.А. БОГДАНОВ¹,
Ю.С. КИВШАРЬ^{1,4}, М.А. ШМИДТ³

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

³Институт фотонных технологий им. Лейбница, Йена, Германия

⁴Австралийский национальный университет, Канберра, Австралия

РЕКОРДНО ЭФФЕКТИВНЫЙ ЗАХВАТ СВЕТА В ОПТОВОЛОКНО ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ

Теоретически предсказана и экспериментально продемонстрирована рекордно высокая эффективность захвата света в оптическое волокно при больших углах падения за счёт нанесения диэлектрической осесимметричной наноструктуры на торец волокна.

О.Ye. YERMAKOV^{1,2}, H. SCHNEIDEWIND³, U. HUBNER³,
T. WIEDUWILT³, M. ZEISBERGER³, A.A. BOGDANOV¹,
Yu.S. KIVSHAR^{1,4}, M.A. SCHMIDT³

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine

³Leibniz Institute of Photonic Technology, Jena, Germany

⁴Australian National University, Canberra, Australia

RECORD-BREAKING LIGHT COUPLING INTO OPTICAL FIBER UNDER LARGE INCIDENT ANGLES

We predict theoretically and demonstrate experimentally record-high efficiencies for coupling of light into optical fiber at large incident angles via the inclusion of dielectric axial-symmetric nanostructure at the fiber facet.

Оптическое волокно является основным элементом систем дистанционного зондирования благодаря небольшому размеру, малому весу и способности принимать и передавать свет на микроскопические участки. Недавний прогресс в технологиях изготовления наноструктур на нетрадиционных подложках открывает путь к интеграции массивов наночастиц на торцах оптоволокон, открывая новое направление «лаборатория на оптоволокне» (“lab-on-fiber”) [1]. Это направление выступает в роли крайне многообещающей платформы для дистанционного сбора света и одиночных фотонов, эндоскопии и

лапароскопии, биосенсоров. В то же время, захват света оптическим волокном стремительно падает при наклонных углах падения, ограничивая рабочий диапазон углов до 15° .

В этой работе экспериментально продемонстрирована рекордно высокая эффективность захвата света в оптическое волокно, которая обеспечивается за счёт расположенной на торце оптоволокна наноструктуры из нитрида кремния (рис. 1а). Этот подход демонстрирует увеличение эффективности захвата света на несколько порядков при больших углах падения по сравнению с оптоволокном с металлической наноструктурой [2] и без наноструктуры [3] (рис. 1б). Кроме того, предложенная реализация практически не зависит от поляризации и азимутального направления падения света, обеспечивая широкие возможности для практических приложений.

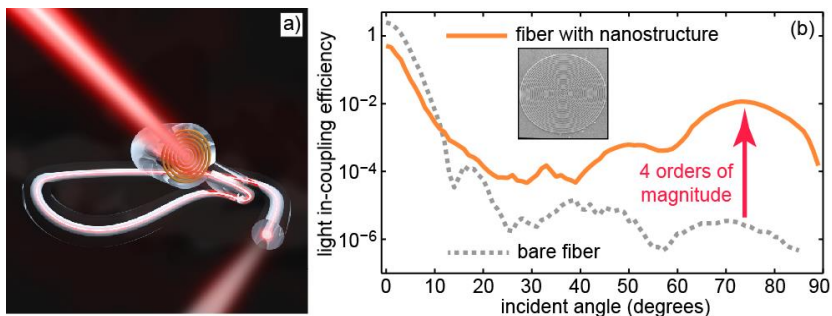


Рис. 1. Концепция повышения эффективности захвата света в оптоволокно при скользющем падении через диэлектрическую кольцевую наноструктуру, нанесённую на торец оптоволокна (а); экспериментально измеренная зависимость эффективности захвата света в наноструктурированное оптоволокно в зависимости от угла падения [4] (б)

Исследование выполнено при поддержке Немецко-Российского междисциплинарного научного центра G-RISC и Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

Список литературы

1. Wang Q., Wang L. // *Nanoscale*. 2020. V. 12(14). P. 7485-7499.
2. Wang N., et al. // *ACS Photonics*. 2019. V. 6(3). P. 691-698.
3. Yermakov O., et al. // *ACS Photonics*. 2020. V. 7(10). P. 2834-2841.

Д.Г. ГИЛЕВ^{1,2}, А.А. ЧУВЫЗГАЛОВ^{1,2}, В.К. СТРУК²,
В.В. КРИШТОП²

¹*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

²*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТОКА

В работе представлен волоконно-оптический датчик тока, основанный на эффекте Фарадея. Обычно при использовании катушки с волокном мешающим фактором является вращение Земли, наводящее дополнительную разность фаз за счёт эффекта Саньяка. В предложенной схеме влияние вращения Земли скомпенсировано за счёт наличия двух оптоволоконных контуров. Порог чувствительности датчика составил 2 мА.

D.G. GILEV^{1,2}, A.A. CHUVYZGALOV^{1,2}, V.K. STRUK²,
V.V. KRISHTOP²

¹*Perm State National Research University*

²*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*

FIBER OPTICAL CURRENT SENSOR

The paper presents a fiber-optic current sensor based on the Faraday effect. Usually, when using a coil of fiber, the interfering factor is the rotation of the Earth, inducing additional phase difference due to the Sagnac effect. In the proposed scheme, the influence of the Earth's rotation is compensated by the presence of two fiber-optic circuits. The sensor's sensitivity threshold was 2 mA.

Для создания датчиков тока используются различные физические эффекты [1]. Протекающий через катушку электрический ток генерирует в пространстве вокруг себя магнитное поле, силовые линии которого представляют собой окружности в случае прямого проводника с током. Величина магнитного поля позволяет определить силу тока, который его индуцировал, по закону полного тока или по закону Био-Савара-Лапласа. Измерение токов при помощи волоконной оптики возможно из-за эффекта Фарадея – магнитооптического эффекта, заключающегося в том, что при воздействии магнитного поля на оптическое волокно, возникает вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного света, распространяющегося в нем [2]. Если в волокне распространяется свет с круговой поляризацией, то изменяется фазовая скорость этой волны. Разница фаз между двумя противоположными волнами (как по

направлению самой волны, так и по направлению вращения светового вектора) пропорциональна величине воздействующего магнитного поля (рис. 1).

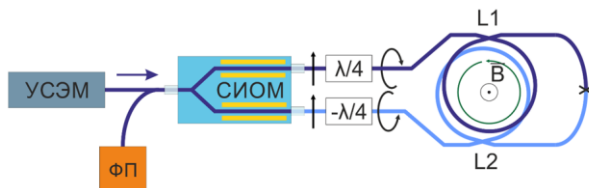


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика тока

Для формирования круговой поляризации из линейной нами был изготовлен специальный волоконно-оптический элемент, преобразующий линейно-поляризованный свет в свет с круговой поляризацией. Такой элемент называется ретардер ($\lambda/4$), он выполняет функцию четвертьволновой пластинки (рис. 2).

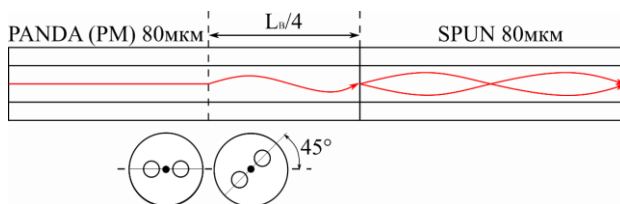


Рис. 2. Схема конструкции ретардера

Круговая поляризация образуется за счёт возникновения биения поляризаций в волокне типа Panda из-за несовпадения поляризации с собственными состояниями поляризации из-за анизотропного строения волокна [3].

По результатам измерений порог чувствительности ВОДТ составил 2 мА. Таким образом, предложенная схема оптоволоконного магнитометра позволяет регистрировать довольно малые токи по сравнению с аналогичными схемами [2], полученной чувствительности вполне достаточно для большинства технических применений.

Список литературы

1. Буймистряк Г.Я. // СПб.: ИВА, ГРОЦ Минатома. 2005. С. 101.
2. Григорьев М.Г., Вавилова Г.В. // Инновации в науке. 2013. № 20.
3. Моршнев С.К. и др. // Фотоника. 2018. Т. 12. № 6. С. 616-633.

Е.А. САВЕЛЬЕВ¹, П.И. КУЗНЕЦОВ¹, Д.П. СУДАС^{1,2},
Г.Г. ЯКУЩЕВА¹

¹*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН*

²*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

СЕНСОРЫ НА ОСНОВЕ ХИМИЧЕСКИ ТРАВЛЕННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С ПОКРЫТИЕМ ИЗ ZnTe

Волоконно-оптические тейпера были изготовлены путем локального химического травления стандартного одномодового оптического волокна (SMF-28) и затем покрыты методом химического осаждения из газовой фазы (MOCVD) тонкими плёнками ZnTe. В спектрах пропускания при определённых толщинах покрытия из ZnTe наблюдались глубокие резонансы затухающей моды (LMR). Их чувствительность составляет более 5000 нм на единицу показателя преломления (нм / ЕПП).

Е.А. SAVELYEV¹, P.I. KUZNETSOV¹, D.P. SUDAS^{1,2},
G.G. YAKUSHCHEVA¹

¹*Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS*
²*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University*

SENSORS ON CHEMICALLY ETCHED OPTICAL FIBER COATED WITH ZnTe COATING

The fiber-optic tapers were prepared by local chemical etching of the standard single-mode optical fiber (SMF-28) and then coated with thin ZnTe films by the metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). The deep lossy mode resonances (LMR) were observed in the transmittance spectra at certain thicknesses of the ZnTe coating. Their sensitivity is more than 5000 nm per refractive index unit (nm / RIU).

Интерес к волоконным датчикам на основе явления LMR в последнее время постоянно возрастает [1-4]. Это связано с широким спектром материалов, применимых для реализации таких устройств, и высокой чувствительностью положения резонанса к условиям окружающей среды. Для создания волоконно-оптических сенсоров с высокой чувствительностью материал покрытия волокна должен обладать высоким показателем преломления. Для ZnTe в диапазоне длин волн от 1 до 2 мкм это значение больше чем 2,72 [5]. С этой точки зрения ZnTe значительно

превосходит все ранее использованные материалы для реализации волоконных LMR датчиков.

В настоящей работе проводилось сравнение чувствительностей первых TE и TM LMR резонансов к изменению показателя преломления водных растворов изопропилового спирта. Для этого в области локального утонения на оптическое волокно SMF-28 методом MOCVD наносилась тонкая плёнка ZnTe. При погружении тейпера в воду максимумы TE и TM LMR резонансов, для первого и второго образца, соответственно, находились в области длины волны 1550 нм (рис. 1а). Чувствительности реализованных рефрактометров для первых TE и TM LMR резонансов составили 5100 (рис. 1б) и 5400 нм / ЕПП, соответственно. Повторное измерение чувствительности сенсоров после длительного их пребывания в воздушной среде показало снижение чувствительности обоих резонансов к изменению показателя преломления внешней среды. Причём эффект был более значительным для сенсора с более тонким слоем ZnTe. Для стабильной работы сенсора необходимо нанесение защитного слоя.

Работа выполнена по Государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-07-00326.

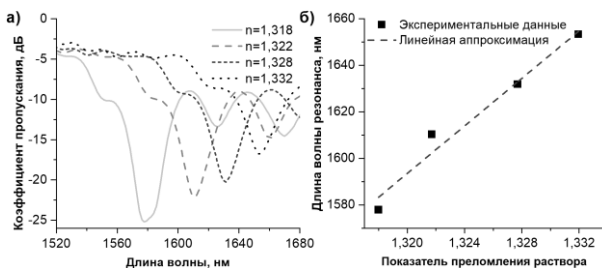


Рис. 1. Спектр пропускания сенсора в различных водных растворах изопропилового спирта (а); зависимость спектрального положения первого TE LMR от показателя преломления раствора (б)

Список литературы

1. Paliwal N., John J. // IEEE Sens. J. 2015. V. 15 (10). P. 5361-5371.
2. Wang Q., Zhao W.-M. // Opt. Lasers Eng. 2018. V. 100. P. 47-60.
3. Ascorbe J., Corres J.M., Matias I.R., Arregui F.J. // Sens. Actuators B Chem. 2016. V. 233. P. 7-16.
4. Arregui F.J., Villar I.D., Zamarreno C.R., Zubiate P., Matias I.R. // Sens. Actuators B Chem. 2016. V. 232. P. 660-665.
5. Li H.H. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1984. V. 13 (1). P. 103-150.

Е.Д. МИНАЕВА^{1,2}, Н.В. МИНАЕВ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛИЧИЙ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ ИЗ ПОРОШКОВ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНО-СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЕКАНИЯ

В работе приведены результаты экспериментов по формированию трёхмерных структур из порошков биосовместимого полимера полилактида, сформированных методом поверхностно-селективного лазерного спекания (ПСЛС). Для отработки процесса изготовления образцов из различных фракций полимерного порошка проведён подбор параметров лазерного воздействия. Полученные мелкосерийные партии образцов трёхмерных структур были охарактеризованы с помощью электронной и сканирующей микроскопии с применением ультрамикротомы.

E.D. MINAEVA^{1,2}, N.V. MINAEV²

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

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

RESEARCH OF DIFFERENCES IN THE INTERNAL STRUCTURE OF THREE-DIMENSIONAL STRUCTURES FORMED WITH POWDERS OF VARIOUS FRACTIONS BY SURFACE-SELECTIVE LASER SINTERING

The paper presents the results of formation of three-dimensional structures from powders of a biocompatible polymer polylactide, formed by the method of surface selective laser sintering (SSLS). To fine-tune the process of making samples from various fractions of polymer powder the parameters of laser action were selected. The obtained small-scale batches of samples of three-dimensional structures were characterized by electron and scanning microscopy using an ultramicrotome.

Тканевая инженерия – наука о восстановлении тканей и органов человека – является одним из актуальных направлений в современной науке. Задача формирования искусственных трёхмерных структур востребована при лечении повреждений различных тканей или органов, например, костной или хрящевой тканей.

Разработка методов формирования искусственных трёхмерных структур из биосовместимых и биорезорбируемых материалов с использованием лазерных аддитивных технологий позволяют формировать трёхмерные структуры различной сложности из различных материалов по заданной трёхмерной модели. Среди всего многообразия разработанных методов можно выделить селективное лазерное спекание (СЛС) и его разновидность – поверхностно-селективное лазерное спекание (ПСЛС). Метод ПСЛС позволяет формировать трёхмерные структуры из апробированных в клинической практике биосовместимых полимерных материалов [1]. Использование воды в качестве сенсibilизатора нагрева позволят формировать трёхмерные структуры без внесения дополнительных веществ или примесей [2].

Целью работы являлось получение мелкосерийных партий образцов из различных фракций полимерного порошка для проведения биологических испытаний. Исходный материал был представлен в виде гранул 3 - 5 мм. Полимерные гранулы замораживались, далее проводился механический помол в мельнице. В ходе работы по формированию трёхмерных структур использовано три фракции порошка, различающихся по размерам частиц полимера: 100 - 200 мкм, 56 - 100 мкм, < 56 мкм. В качестве сенсibilизатора нагрева использовался мелкодисперсный водяной туман, позволяющий локализовать процесс нагрева в тонкой приповерхностной зоне полимерных частиц. Для формирования образцов была использована экспериментальная система ПСЛС [3].

В процессе исследования отработан алгоритм подбора параметров процесса лазерного спекания, сформированы трёхмерные структуры из различных фракций, готовые для дальнейшего использования для биологических исследований на биосовместимость.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-32-20184) в части подбора режимов ПСЛС полимерных порошков и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН в части развития лазерных аддитивных технологий.

Список литературы

1. Antonov E.N., Bagratashvili V.N., et al. // *Advanced Materials*. 2005. V. 17. P. 327-330.
2. Antonov E.N., Krotova L.I., et al. // *Quantum Electronics*. 2015. V. 45 (11). P. 1023-1028.
3. Минаев Н.В., Антонов Е.Н. и др. // *Приборы и техника эксперимента*. 2019. Т. 1. С. 150-152.

О.Ф. ПРОСОВСКИЙ¹, Д.Г. ДЕНИСОВ², Ю.О. ПРОСОВСКИЙ^{1,2}

¹*Обнинское научно-производственное предприятие «Технология»
им. А.Г. Ромашина, Калужская обл.*

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана*

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ТИПА GLAD ДЛЯ ЗАДАЧ СОВРЕМЕННОЙ ОПТОТЕХНИКИ

Было получено покрытие типа GLAD (Glancing-angle deposition, рис. нанесение под углом). Были проанализированы основные характеристики полученного покрытия. Проведено сравнение полученного покрытия типа GLAD и «классического» покрытия. Была разработана и проанализирована математическая модель GLAD покрытия. Были получены реальные спектральные характеристики такого покрытия и было произведено сравнение с математической моделью.

O.F. PROSOVSKIY¹, D.G. DENISOV², Yu.O. PROSOVSKIY^{1,2}

¹*Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya, Kaluga Region*

²*Bauman Moscow State Technical University*

DEVELOPMENT OF ADVANCED THIN-FILM OPTICAL COATINGS OF THE GLAD TYPE FOR MODERN OPTICAL TECHNOLOGY

A GLAD type coating was obtained. The main characteristics of the obtained coating were analyzed. The comparison of the obtained coating of the GLAD type and the "classical" coating is carried out. A mathematical model of GLAD coverage was provided and analyzed. The real spectral characteristics of such coverage were obtained and a comparison was made with a mathematical model.

Сегодня, оптика и современные оптические приборы широко применяются для решения задач промышленности, народного хозяйства и занимают особое место в сфере производства РФ. При этом, свойства и характеристики современных оптических деталей определяет не только материал, их конфигурация, но и уникальные оптические покрытия, среди которых выделяют: уникальные отражающие, просветляющие, гидрофобные покрытия, имеющие свои оптические постоянные: коэффициент пропускания T , коэффициент отражения R и показатель преломления n , определяющие в значительной степени номенклатуру

современных тонкоплёночных покрытий. Минимизация R и увеличение T определяют технологический процесс просветления. На сегодняшний день, очень остро стоит вопрос о просветлении поверхностей оптических деталей. Было математически смоделировано то, что при увеличении пористости покрытия – его просветляющая способность возрастает [1]. Именно поэтому, особое внимание заслуживает GLAD (Glancing-angle deposition) покрытие – покрытие, структура которого представляет собой ряд упорядоченных колонн с небольшими промежутками между ними [2]. Светофильтры с таким покрытием обеспечивают хорошее просветление на определённой длине волны, что позволяет их использовать для лазерных систем и приборов. На рис. 1 представлена структура такого GLAD покрытия. Данное покрытие возможно получить путем наклона подложки под некоторым углом (экспериментально было определено, что оптимальный угол равен 70 градусам) по отношению к потоку испаряемых веществ [3].

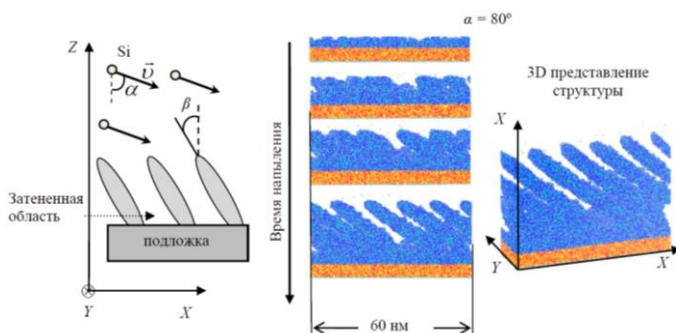


Рис. 1. Структура GLAD покрытия

Список литературы

1. Vedam K., Limsuwan P. Piezo- and elasto-optic properties of liquids under high pressure. II. Refractive index vs density // The Journal of Chemical Physics. 1978. V. 69. P. 4772-4778.
2. Hawkeye M.M., Brett M.J. Glancing angle deposition: Fabrication, properties, and applications of micro- and nanostructured thin films // J. of Vac. Sci and Techn. 2017. V. 25. P. 1317.
3. Trottier-Lapointe W., Zabeida O., Schmitt T., Martinu L. Ultralow refractive index optical films with enhanced mechanical performance obtained by hybrid glancing angle deposition // Appl. Opt. 2016. V. 55. P. 8796-8805.

Д.Д. МЕРКУШЕВ, Р.П. МАТИТАЛ, Р.Д. ЗВАГЕЛЬСКИЙ,
Д.А. КОЛЫМАГИН, А.Г. ВИТУХНОВСКИЙ, Д.А. ЧУБИЧ

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

ТРЕХМЕРНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ: ИЗУЧЕНИЕ МОРФОЛОГИИ И ПРОПУСКАНИЯ

В данной работе мы изготовили оптические межсоединения (волноводы) методом прямой лазерной печати и изучили их морфологию. Были проанализированы оптические свойства изготовленных фотонных структур, в том числе измерены потери при прохождении света по оптическим межсоединениям. Установлено, что излучение эффективно распространяется в волноводах, изготовленных рассмотренным методом.

D.D. MERKUSHEV, R.P. MATITAL, R.D. ZVAGELSKY,
D.A. KOLYMAGIN, A.G. VITUKHNOVSKY, D.A. CHUBICH

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

THREE-DIMENSIONAL POLYMER OPTICAL INTERCONNECTIONS: STUDYING MORPHOLOGY AND TRANSMISSION

In this work, we fabricated optical interconnects (waveguides) by direct laser printing and studied their morphology. The optical properties of the fabricated photonic structures were analyzed, including the measurements of losses during the transmission of light through optical interconnections. It is found that radiation is efficiently propagated in waveguides fabricated by the considered method.

В последние несколько десятилетий передача данных на основе использования кремниевой фотоники стремительно развивается и играет важную роль во многих областях промышленности. Однако, доступные методы интеграции элементов ввода/вывода излучения и соединения между фотонными чипами имеют высокие потери излучения, могут зависеть от поляризации и иметь высокие производственные затраты. Недавно проведённые исследования продемонстрировали существование новой технологии изготовления оптических межсоединений с малыми

потерями при фотонном соединении, прозрачных для телекоммуникационной длины волны 1550 нм [1].

Методика прямой лазерной печати основана на нелинейном процессе двухфотонной полимеризации специального материала – фоторезиста. Фемтосекундное лазерное излучение 780 нм фокусируется в фоторезисте, что приводит к двухфотонному поглощению и контролируемой локальной полимеризации. Изучение морфологии оптических межсоединений производилось при помощи конфокального микроскопа, сканирующего электронного микроскопа, атомно-силового микроскопа и оптического (рис. 1) микроскопа. Были рассмотрены и подобраны различные фоторезисты для прямого лазерного письма, непосредственно в которых и производилось изготовление межсоединений [2]. Были изготовлены и охарактеризованы полимерные межсоединения.

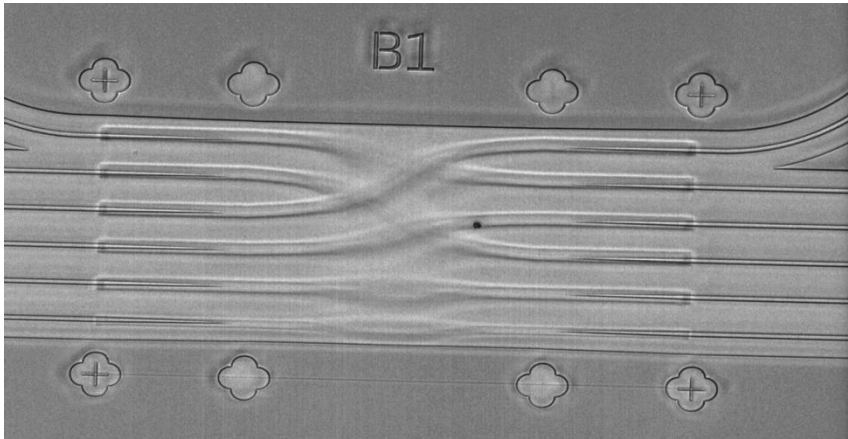


Рис. 1. Изображение оптических межсоединений, полученное в оптическом микроскопе при помощи высокоапертурного объектива Zeiss 63x NA 1,4

Список литературы

1. Blaicer M., Billah M.R. Hybrid multi-chip assembly of optical communication engines by in situ 3D nano-lithography // Light: Science & Applications. 2020. Article number. 71.
2. Zvagelsky R.D., Chubich D.A., Kolymagin D.A., Korostylev E.V., Kovalyuk V.V., Prokhodtsov A.I., Tarasov A.V., Goltsman G.N., Vitukhnovsky A.G. Three-dimensional polymer wire bonds on a chip: morphology and functionality // Journal of physics D. Applied physics. 2020. DOI: 10.1088/1361-6463/ab8e7f.

Д.Г. ДЕНИСОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОЭП РЕГИСТРАЦИИ
СПЕКЛ-МОДУЛИРОВАННОГО ПОЛЯ В ЗАДАЧАХ
КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ И КАЧЕСТВА
ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Изучены и представлены результаты современных источников исследования с целью анализа возможностей классификации существующих оптико-электронных приборов (ОЭП), предназначенных для контроля параметров формы и качества оптических поверхностей. Дана сравнительная оценка методов регистрации и обработки спекл-модулированного электромагнитного поля рассеянного от поверхностей различного класса перспективных оптических изделий.

D.G. DENISOV

Bauman Moscow State Technical University

**CURRENT STATE OF OES REGISTRATION
OF SPECKLE-MODULATED FIELDS IN THE PROBLEMS
OF CONTROL OF THE SHAPE AND QUALITY PARAMETERS
OF OPTICAL SURFACES**

The results of modern researches were studied and presented in order to analyze the classification possibilities of existing optoelectronic devices, designed to control the parameters of the shape and quality of optical surfaces. A comparative assessment of the methods of registration and processing of speckle modulated electromagnetic field scattered from surfaces of various classes of promising optical products is given.

При когерентном освещении шероховатой оптической поверхности, поле отражённого излучения оказывается состоящим из вкладов от большого числа различных рассеивающих точек (или площадок), совокупность которых представляет собой нормально развитую спекл-картину [1]. Изображение отражающей оптической шероховатой поверхности, освещённой когерентным излучением, представляет собой сложную гранулярную структуру, не имеющую явной связи с микроскопическими свойствами освещаемой оптической поверхности. Можно считать [1], что основной вклад в рассеяние вносят малые участки поверхности с центрами в зеркально отражающих точках. С увеличением радиусов кривизн [1] микронеровностей шероховатой оптической поверхности и величины освещаемой области число вторичных

излучателей возрастает. Волна, отражённая от такой оптической шероховатой поверхности, может быть представлена в виде суперпозиции большого числа элементарных волн, отражённых от малых участков поверхности, которые можно считать независимыми рассеивающими центрами. Распространение отражённого излучения до области наблюдения приводит к тому, что в заданной точке наблюдения складываются рассеянные компоненты каждая со своей фазовой задержкой. Интерференция некоторых сфазированных и когерентных волн приводит к формированию спекл-модулированного электромагнитного поля или гранулированной спекл-картине [1], характеризуемой такими её статистическими характеристиками как контрастом, средним значением флуктуаций интенсивности и средним значением интенсивности в видеоизображении.

Для регистрации и последующей обработки такой спекл-картины на сегодняшний день применяются различные модификации спекл-интерферометров, а также приборы диагностики углового распределения рассеянной индикатрисы лазерного излучения. Спецификой применяемых сдвиговых цифровых интерферометров является возможность создания особого хода пучков в его каналах и регистрация результирующего электромагнитного поля, отражённого от поверхности оптического изделия. В качестве современного класса оптических деталей, могут выступать как изделия лазерной оптики (оптические элементы), типовые оптические детали (оптические линзы, пластины и призмы), так и изделия астрономической и космической оптики, требования к качеству профилей поверхностей которых достигают единиц и долей нанометров. Под качеством профилей поверхностей оптических деталей будем понимать масштабный фактор [2], определяемый как характерное отношение среднеквадратического отклонения высотных параметров профилей оптических деталей к длине волны оптического излучения прибора контроля. Таким образом корректный выбор метода и прибора для обработки статистических характеристик спекл-структуры на этапах технологического (промежуточного) и аттестационного (конечного) контроля будет определяться величиной масштабного фактора, как критерия классификации существующей номенклатуры методов и ОЭП, регистрирующих статистические характеристики спекл-структуры.

Список литературы

1. Денисов Д.Г., Карасик В.Е. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2011. № 2. С. 36-47.
2. Denisov D.G. , et al. / Measurement Techniques. 2017, V. 60. Is. 2. P. 121-127.

П.В. ЗИНИН, К.М. БУЛАТОВ, И.В. МАЛЫХИНА, А.А. БЫКОВ
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

КАЛИБРОВКА СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПЗС-МАТРИЦ

В данной работе описан метод калибровки пространственной спектральной чувствительности мультиспектральной камеры и проведено сравнение с другими известными методами калибровки.

P. V. ZININ, K. M. BULATOV, I. V. MALYKHINA, A. A. BYKOV
Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

CALIBRATION OF THE SPECTRAL SENSITIVITY OF THE CCD-MATRIX

In this paper, a method for calibrating the spatial spectral sensitivity of a multispectral camera is described and compared with other known calibration methods.

Одной из важных характеристик в физическом эксперименте остаётся спектральная чувствительность приёмника излучения. Для качественной обработки экспериментальных данных необходимо знать спектральную чувствительность ПЗС-матрицы. Известны следующие методы измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы [1]: калибровка непрерывным лазерным источником, калибровка лампой, калибровка импульсным лазерным источником излучения, калибровка кадра плоского поля. Калибровка непрерывным лазерным источником предполагает использование источника излучения с известным спектральным распределением энергии. Применяемость лазера по некоторым техническим его характеристикам (длина волны, спектральная ширина линии излучения) не даёт полной картины о спектральной чувствительности матрицы камеры. Калибровка кадра плоского поля – это один из способов калибровки пространственного распределение светочувствительных матричных фотоприёмников [2]. Недостатки такого метода хорошо известны: калибрующий световой пучок является равномерным лишь с некоторой, как правило, небольшой, точностью и не может рассматриваться как эталонный.

Для проведения калибровки мультиспектральной камеры была разработана схема и собран макет (рис. 1). Схема экспериментальной

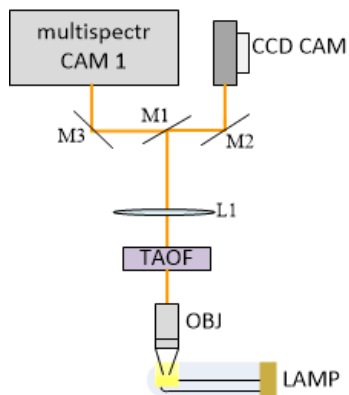


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

установки состоит из LAMP (СИ 6-100); OBJ (20 X Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Long WD Objective NA: 0.42); L1 (AC 254-400-A) с фокусным расстоянием 400 мм; ТАОФ (двойной акустооптический фильтр производства НТЦ УП РАН) [3]; OBJ и L1 могут быть с разными фокусными расстояниями в зависимости от увеличения оптической системы. В этом случае требуется увеличение $\times 20$, поворотное зеркало M1 позволяет переключать ход оптических лучей между камерами, зеркала M2 и M3 используются для юстировки.

В схеме использовался источник теплового излучения с известной спектральной плотностью. Излучение лампы $I_{\text{ист}}(\lambda_{\text{н}})$ попадает на объектив с коэффициентом пропускания $K_{\text{obj}}(\lambda)$ и проходит через ТАОФ-фильтр с изменяющимся коэффициентом пропускания $K_{\text{ТАОФ}}(\lambda)$. Далее излучения попадает на линзу с коэффициентом пропускания и по средствам зеркал M1 и M2 происходит фокусировка на CCD CAM2. После чего поворотным зеркалом M1 переводим оптическую систему на CAM1 получая гиперспектральное изображение. Параметры системы остаётся неизменным, за исключением коэффициента чувствительности камеры 1. На основе проведённых измерений был получен график отображающий зависимость чувствительности камеры $K(\lambda)$ от длины волны. Аналогичная зависимость, была заявленная производителем. Сравнивая изображения зависимости, было принципиально видно, что экспериментальная кривая отлична от заявленной производителем, а именно каждый канал камеры захватывает соседний спектральный канал. Возможно, это вызвано смещением частей фильтров.

В качестве калибровки мультиспектральной камеры был собран макет и проведён эксперимент. Данный метод позволяет определять пространственную спектральную чувствительность ПЗС-матрицы.

Список литературы

1. Васин Б.Л. и др. Методика измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы. Препринт ФИАН 18. 2007.
2. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприёмными матрицами. Новосибирск: Наука, 2005.
3. Bulatov K.M., et al. // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41 (6). С. 864-868.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В СХЕМЕ ФОТОННОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ДИСПЕРСИОННЫМ
РАСТЯЖЕНИЕМ СИГНАЛА ВЫБОРКИ**

Представлены результаты численного моделирования многоканального фотонного аналого-цифрового преобразователя с оптической дискретизацией и электронным квантованием на основе схемы с дисперсионным растяжением импульсов выборки.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**SPECIFICITIES OF FEMTOSECOND LASER PULSED
GENERATORS APPLICATION IN PHOTONIC ANALOGUE
TO DIGITAL CONVERTOR SCHEME BASED ON DISPERSIVE
STRETCH OF SAMPLING SIGNAL**

The results of numeric modeling of multichannel optical sampling electronic quantization photonic analogue to digital converter scheme based on dispersive stretch of sampling pulses are presented.

Лазеры с синхронизацией мод (ЛСМ) с частотой повторения до нескольких гигаимпульсов в секунду и апертурной ошибкой (джиттером) вплоть до десятков аттосекунд (10^{-17} с) вызывают интерес в области разработки систем широкополосных фотонных аналого-цифровых преобразователей (ФАЦП) [1, 2].

Одним из перспективных подходов к построению ФАЦП на основе ЛСМ является использование гибридной мультисканальной схемы с оптической выборкой и электронным квантованием (рис. 1). Импульсы ЛСМ поступают на вход мультиспектрального умножителя частоты (МСУ), производящий ЛЧМ-модуляцию входных импульсов так, чтобы выбранные спектральные компоненты имели различную временную задержку на выходе МСУ. Последовательность чирпированных импульсов поступает на вход электрооптического амплитудного модулятора (ЭОМ),

управляемого детектируемым СВЧ-сигналом. Стандартный телекоммуникационный демультиплексор (ДМ) производит разделение сигнала по отдельным каналам, в которых импульсы детектируются с помощью фотодетекторов (ФД) и подвергаются постобработке в блоке электронной обработки (БЭО). Использование оптического волокна в МСУ является одним из распространённых методов осуществления процедуры чирпа в схемах ФАЦП [3, 4].

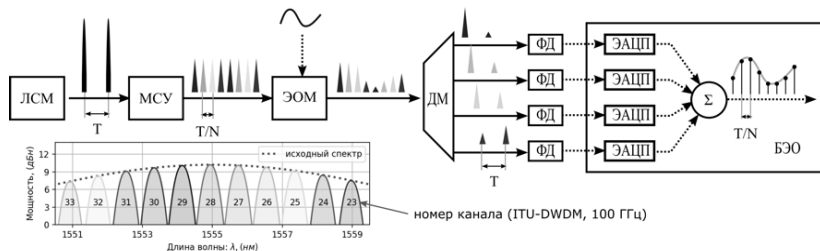


Рис. 1. Схема многоканального мультиспектрального ФАЦП с оптической дискретизацией и электронным квантованием, на графике: спектр типичного ЛСМ и ИТУ-DWDM каналы в 3 дБ диапазоне спектральной плотности мощности

Основной проблемой устройств, работающих по схеме с рис. 1 является недостаток мощности лазерного излучения на фотодетекторах с одной стороны и ограничение мощности исходного сигнала ЛСМ с другой. Современные ЛСМ с частотой повторения импульсов свыше 1 ГГц обладают такими характеристиками, как длительность импульса 100 - 500 фс, ширина спектра порядка 10 нм, с центральной длиной волны излучения в телекоммуникационном диапазоне С. При средней мощности 100 мВт, пиковая составляет порядка 300 Вт. Такая мощность приводит к усилению нелинейных эффектов в оптоволокне, приводящих к значительным искажениям в работе ФАЦП. Численно показано, что при увеличении средней мощности выше 80 мВт происходит заметное перераспределение мощности в спектральных компонентах импульса, а при средней мощности выше 110 мВт начинает формироваться солитон.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 20-37-90119.

Список литературы

1. Valley G. Photonic analog-to-digital converters // Optics Express. 2007. V. 15. P. 1955-1982.
2. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. Т. 2.
3. Gupta S., Jalali B. // Optics Letters. 2008. V. 33(22). P. 2674.
4. Jalali, et al. // Laser Photonics Rev. 2013. V. 7. No. 2. P. 207-263.
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996.

В.М. ПЕТРОВ, А.В. ШАМРАЙ¹, И.В. ИЛЬЧЕВ¹,
Н.Д. ГЕРАСИМЕНКО, В.С. ГЕРАСИМЕНКО,
П.М. АГРУЗОВ¹, В.В. ЛЕБЕДЕВ¹

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

РЕЖИМЫ РАБОТЫ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ СВЧ ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

В данной работе описываются амплитудные и фазовые СВЧ интегрально-оптические модуляторы нашего производства, предназначенные как для обычных, оптических, так и для квантовых линий связи, а также приводятся результаты исследований различных режимов работы и параметры таких модуляторов.

V.M. PETROV, A.V. SHAMRAI¹, I.V. IL'ICHEV¹,
N.D. GERASIMENKO, V.S. GERASIMENKO,
P.M. AGRUZOV¹, V.V. LEBEDEV¹

ITMO University, Saint-Petersburg

¹*Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg*

OPERATING MODES OF AMPLITUDE AND PHASE MICROWAVE INTEGRATED OPTICAL MODULATORS

In this paper we report about amplitude and phase microwave integrated optical modulators designed and produced by us for optical and quantum communications. Also we discuss about operating modes and parameters of these modulators.

СВЧ интегрально-оптические модуляторы являются одним из важных элементов, необходимых для построения квантовых линий связи, таких, как технология квантовой рассылки ключа на боковых частотах [1]. В этой технологии предполагается использование как амплитудных, так и фазовых модуляторов.

Амплитудный модулятор изготавливается на подложке ниобата лития X-среза и представляет собой оптический интерферометр Маха-Цендера. Волноводы его плеч располагаются в межэлектродном зазоре копланарной СВЧ-линии, на основе электродов бегущей волны. Фазовый модулятор изготавливается на подложке ниобата лития Z-среза и представляет собой одиночный прямой волновод, располагающийся под центральным электродом копланарной СВЧ-линии [2]. Важно отметить, что для изготовления оптических волноводов с чрезвычайно малыми потерями

(менее 0.01 дБ/мм) была отработана оригинальная технология диффузии ионов титана с предварительным окислением и специальными мерами подавления обратной диффузии лития [3].

Разработанные и изготовленные интегрально-оптические амплитудные и фазовые СВЧ-модуляторы обладают шириной полосы рабочих частот не менее 20 ГГц (по спаду АЧХ на 3 дБ) [4]. Полуволновое напряжение 5.4 В обеспечивает эффективную генерацию боковых частот, что в полной мере отвечает требованиям, предъявляемым к модуляторам как для «обычных» систем оптической связи с амплитудной и фазовой модуляцией, так и для систем связи, использующих принцип квантовой рассылки ключа на боковых частотах.

Интересные функциональные возможности появляются при использовании наших модуляторов в схеме с оптической обратной связью, выполненной в виде отрезка волокна. В этом случае возникает большое количество высших гармоник, что приводит к режиму работы близкому, к comb-генерации [5]. Режим comb-генерации, полученный при использовании фазового модулятора представлен на рис. 1.

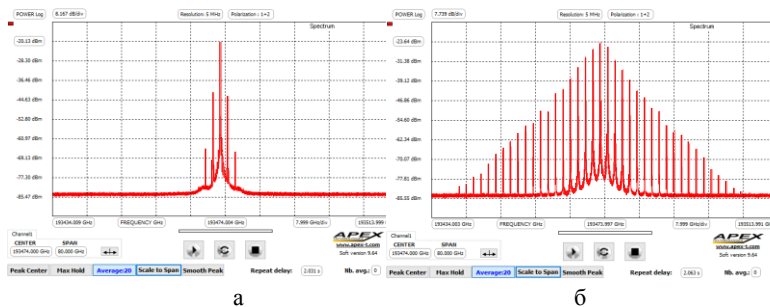


Рис. 1. Режим comb-генерации с использованием фазового модулятора: спектр на выходе модулятора, частота фазовой модуляции $F = 1.725$ ГГц (а), включена оптическая обратная связь (б)

Список литературы

1. Gleim A.V., et al. // Journal of Optical Technology. 2017. V. 84(6). P. 362-367.
2. Петров В.М., Шамрай А.В. // Интерференция и дифракция для информационной фотоники. С.-Пб.: Лань, 2019.
3. Лебедев В.В., Ильичев И.В., Агзузов П.М., Тронеv А.В., Шамрай А.В. Оптический модулятор. Патент РФ № 187990 U1.
4. Петров В.М., Шамрай А.В. и др. // Фотоника. 2020. Т. 14(5). С. 414-423.
5. Петров В.М., Шамрай А.В. и др. // Фотоника. 2020. Т. 14(7). С. 570-582.

В.В. ГРИШАЧЕВ

Российский государственный гуманитарный университет, Москва

**АНАЛИЗ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ
В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ:
ОПТИЧЕСКОЕ ТУННЕЛИРОВАНИЕ**

Численные оценки перехвата информации на основе оптического туннелирования информационного сигнала из волоконно-оптического канала оптической системы связи в канал утечки показывает высокий уровень угроз информационной безопасности критической информационной инфраструктуры. Перехват может быть реализован скрытно в полевых условиях с вероятностью появления ошибочного бита не большим чем в линии связи, даже при сохранении структуры оптического волокна и с минимальными разрушениями защитных оболочек кабеля.

V.V. GRISHACHEV

Russian State University of the Humanities, Moscow

**ANALYSIS OF INFORMATION LEAKAGE CHANNELS
IN FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES:
OPTICAL TUNNELING**

Numerical estimation of information interception based on optical tunneling information signal from fiber optic communication systems in a channel leak shows a high-level threat of information security of critical information infrastructure. Interception can be implemented covertly in the field with the probability of an error bit appearing, no more than in the communication line, even while preserving the structure of the optical fiber and with minimal damage to the cable's protective shells.

Передача информации через оптический кабель обладает высокой защищённостью от перехвата [1 - 3], т.е. несанкционированного доступа к передаваемой по сетям связи информации с помощью средств технической разведки. Структура перехвата включает штатный канал и канал утечки и по способу формирования перехват делится на два вида.

Дистанционный перехват формируется путем регистрации оптических и неоптических информативных сигналов. Например, при свободном выходе оптических излучений за пределы оптического кабеля в виде вытекающих мод; при нелинейно-оптических демодуляциях оптической

несущей приводящих к генерации информативных паразитных электромагнитных излучений на частотах модуляции и т.п. [3].

Контактный перехват формируется путем отвода части информационного оптического сигнала из канала связи в канал утечки и связан с выводом части излучения из оптоволокна [1, 2]. Технологии деления оптического излучения успешно применяются для создания устройств управления в различных штатных оптических сетях, в том числе санкционированного подключения к ним. Например, волоконно-оптическая прищепка FOD-5503 используется для голосовой связи путем вывода/ввода части излучения на изгибе волокна.

Контактные перехваты представляют наибольший уровень угрозы по эффективности, например, перехват отводом части оптического излучения методом оптического туннелирования. Эффективность метода определяется возможностью не обнаруживаемого системами мониторинга вывода оптического излучения из контролируемой линии в канал утечки в полевых условиях без нарушения защитной оболочки волокна.

Численные оценки формирования эффективного канала утечки оптическим туннелированием в приближении фиксированного оптического контакта волокна канала утечки с оболочкой волокна канала связи без её разрушения с отводом мощности порядка 10 фотонов на бит передаваемой информации позволяет создать перехват трафика с вероятностью появления ошибочного бита штатной линии связи. Структура канала утечки реализуема в полевых условиях путем внедрения микроманипуляторов в оптический кабель с незначительными разрушениями его оболочек и фиксации контакта оптическим клеем. Выявление подключения нарушителем по данной схеме к линии связи существующими методами мониторинга значительно затруднены как на этапе формирования канала утечки, так и на этапе эксплуатации.

Эффективное противодействие перехвату трафика в оптических сетях данным способом возможно криптографическими методами и методами квантовой криптографии.

Список литературы

1. Shubin V.V. Information Security of Fiber-Optic Systems // Sarov. RFNC-VNIIEF, 2015. P. 257.
2. Grishachev V.V., Kabashkin V.N., Frolov A.D. // Information Counteraction to the Terrorism Threats. 2005. V. 4. P. 194-2004.
3. Grishachev V.V. // Photonics Russia. 2019. V. 13 (3). P. 280-294.

А.П. ПЛЁНКИН, Р.С. ЗОРИН, Б.Х. НГУЕН, Д.С. РОСТЕНКО
*Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета,
Таганрог*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАТУХАНИЙ В КВАНТОВОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕДИАКОНВЕРТЕРОВ

Приведено описание квантового канала связи для автокомпенсационных систем квантового распределения ключей с фазовым кодированием состояний фотонов. Проведены исследования волоконно-оптической линии связи при использовании оптических модулей различной мощности. Проведён расчёт затуханий оптического сигнала в квантовом канале и предложены меры по повышению вероятности вхождения в синхронизм системы квантового распределения ключей.

A.P. PLJONKIN, R.S. ZORIN, NGUEN BA HUI, D.S. ROSTENKO
Engineering and Technological Academy of Southern Federal University, Taganrog

EXPERIMENTAL STUDIES OF ATTENUATIONS IN A QUANTUM COMMUNICATION CHANNEL USING MEDIA CONVERTERS

A description of a quantum communication channel for self-compensation systems of quantum key distribution with phase coding of photon states is given. The research of fiber-optic communication line using optical modules of different power was carried out. A calculation of the attenuation of an optical signal in a quantum channel is carried out and measures to increase the probability of entering the phase matching of the quantum key distribution system were proposed.

Волоконно-оптические системы квантового распределения ключей (СКРК) функционируют при использовании квантовых протоколов. СКРК представляет собой две станции, разнесённые друг относительно друга. Соединение станций осуществляется посредством квантового канала, который реализуется в виде волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Для автокомпенсационных систем достаточным условием является наличие одного волокна. В реальных условиях эксплуатации систем квантовой связи не всегда есть возможность прокладки отдельного оптического канала. Таким образом, используются существующие

волоконно-оптические линии связи, которые нуждаются в предварительном исследовании на предмет затуханий и ответвлений.

В рамках проектирования квантово-криптографической сети нами проведены экспериментальные исследования по вносимым затуханиям в ВОЛС. В качестве квантового канала использованы катушки одномодового оптического волокна длинами 2, 4, 25, 27 км. В качестве стыкующих элементов применялись соединительные адаптеры различного форм-фактора и сварные соединения. В качестве источников оптического излучения выступали парные оптические SFP модули WDMиSFP-R-20 с функцией мультиплексирования. Замер оптических потерь производился с применением высокоточного оборудования – рефлектометра Yokogawa AQ7275. В результате проведённых экспериментальных исследований построены зависимости применяемых типов соединительных узлов от вносимых потерь. Последнее даёт возможность сформировать рекомендации по использованию типов оптических соединителей при проектировании квантового канала связи с целью минимизации вносимых затуханий. Такой подход позволяет повысить вероятность вхождения в синхронизм автокомпенсационной СКРК.

Работа выполнена при поддержке «Pljonkins int. Corp.»

Список литературы

1. Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H. Quantum cryptography // *Reviews of Modern Physics*. 2002. V. 74. № 1. P. 145-195.
2. Pljonkin A.P., Gupta B.B., Rummyantsev K.E., Korovin I., Schaefer G. Features of detection of a single-photon pulse at synchronisation in quantum key distribution systems // 6th International Conference on Informatics, Electronics and Vision & 7th International Symposium in Computational Medical and Health Technology. P. 1-5. DOI: 10.1109/ICIEV.2017.8338555.
3. Pljonkin A.P., Singh P.K. The Review of the commercial quantum key distribution system // 2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/PDGC.2018.8745822.
4. Wang C., Huang D., Huang P., Lin D., Peng J., Zeng G. 25 mhz clock continuous-variable quantum key distribution system over 50 km fiber channel // *Sci. Rep.* 2015. V. 5(4). P. 102-108.
5. Liu R., Yu H., Zan J., Gao S., Wang L., Xu M., Tao J., Liu J., Chen Q., Zhao Y. Analysis of polarization fluctuation in long-distance aerial fiber for QKD system design // *Optical Fiber Technology*. 2019. V. 48. P. 28-33.

И.Ю. БЛИНОВ, А.А. РАКОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ В ЛАЗЕРНОМ ДАЛЬНОМЕРЕ

Приведены результаты математического моделирования корреляционной обработки, позволяющие оценить степень влияния различных флуктуаций на корреляционную функцию псевдослучайных сигналов. Рассмотрен принцип лазерной дальнометрии с применением псевдослучайной импульсно-кодовой модуляции оптического излучения. Из-за особых автокорреляционных свойств псевдослучайных сигналов удается добиться высокой точности измерения расстояния.

I.Yu. BLINOV, A.A. RAKOV, N.P. KHATYREV

*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements,
Mendeleevo, Moscow region*

MATHEMATICAL MODELING OF CORRELATION PROCESSING OF PSEUDO-RANDOM SIGNALS IN A LASER RANGEFINDER

The results of mathematical modeling of correlation processing are presented, which make it possible to assess the degree of influence of various fluctuations on the correlation function of pseudo-random signals. The principle of laser ranging using pseudo-random pulse-code modulation of optical radiation is considered. Due to the special autocorrelation properties of pseudo-random signals, it is possible to achieve high accuracy in distance measurement.

В различных областях использования дальномеров постоянно ужесточаются требования к точности, предельной измеряемой дальности, темпу измерений, массе и габаритам аппаратуры. В связи с этим, на рынке можно встретить широкий ассортимент дальномеров для разных динамических диапазонов. Возникает потребность в более универсальном устройстве измерения расстояния с широким динамическим диапазоном.

В данной работе предложен принцип измерения расстояния с помощью псевдослучайной импульсно-кодовой модуляции сигнала. Данный метод измерения расстояния объединяет принципы работы

фазового и импульсного дальномера, что позволяет расширить динамический диапазон и сохранить высокую точность измерений. Данный технический результат возможен благодаря случайному характеру в течение одного периода зондирующей последовательности, что, в свою очередь, ведет к резкому росту корреляционной функции.

Лазерный дальномер посылает модулированное оптическое излучение, которое распространяется в открытом пространстве, вследствие чего оно претерпевает некоторые изменения. В работе представлен анализ влияния аддитивного шума, джиттера (фазового дрожания сигнала), импульсного отклика системы на результат измерений. Для анализа влияния всех вышеперечисленных флуктуаций была предложена математическая модель прототипа устройства на множестве реализаций (рис. 1). Как можно заметить, корреляционный метод устойчив к помехам, максимумы функций лежат в интервале $t_{ii} \pm \Delta t$.

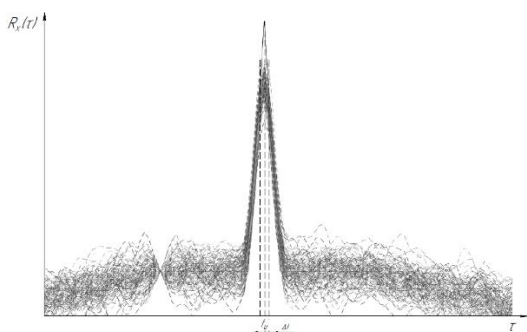


Рис. 1. Результат вычисления корреляционной функции множества реализаций

Наличие аддитивного шума, джиттера и импульсного отклика системы явно сказываются на погрешности измерений, но при изменении длины последовательности СКО δ_t существенно уменьшается. К примеру, при одинаковых значениях флуктуаций, но разных длинах последовательности $2^7 - 1$ и $2^{15} - 1$, СКО δ_t уменьшается примерно в 64 раза.

Список литературы

1. Раков А.А., Хатырев Н.П., Блинов И.Ю. // Альманах современной метрологии. 2020. V. 3 (23). P. 153-170.
2. Патент РФ № 2720268, 28.10.2019.
3. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001.
4. Карасик В.Е., Орлов В.М. Учеб. пособие «Лазерные системы видения». Москва: Издательство МГТУ им. Баумана, 2001.

Г.И. ГРЕЙСУХ, Е.Г. ЕЖОВ, О.А. ЗАХАРОВ, С.В. КАЗИН
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВЛИЯНИЕ ПОБОЧНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ ПОРЯДКОВ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ФОРМИРУЕМОГО РЕФРАКЦИОННО-ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Путем компьютерного моделирования и экспериментально исследовано влияние побочных дифракционных порядков дифракционного корректора хроматизма на качество изображения вблизи оптической оси, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой, рассчитанной на излучение среднего ИК-диапазона (3 - 5 мкм).

G.I. GREISUKH, E.G. EZHOV, O.A. ZAKHAROV, S.V. KAZIN
Penza State University of Architecture and Construction

EFFECT OF SIDE DIFFRACTION ORDERS ON IMAGING QUALITY PRODUCED BY A REFRACTIVE-DIFFRACTIVE MIDDLE WAVE INFRARED OPTICAL SYSTEM

The influence of side diffraction orders of the diffraction chromatism corrector on the image quality near the optical axis, formed by a refractive-diffractive optical system, designed for radiation in the mid-IR range (3 - 5 μm), has been investigated by means of computer modeling and experimentally.

Введение дифракционного корректора (ДК) в рефракционный объектив тепловизора позволяет упростить его оптическую схему и достичь при этом требуемых оптических характеристик. Однако дифракционный механизм преобразования волнового фронта на микроструктуре ДК приводит к тому, что в рефракционно-дифракционных оптических системах видимого спектрального диапазона на изображение, сформированное излучением, дифрагированным в рабочий порядок дифракции, накладывается паразитное излучение, сформированное за счёт дифракции на этой же микроструктуре в побочные дифракционные порядки [1].

В работе путем компьютерного моделирования исследовано влияние побочных дифракционных порядков микроструктуры Hybrid Ge Aspheric Lens (HGAL) No 68-260 [2] на качество изображения вблизи оптической

оси, формируемого рефракционно-дифракционной оптической системой, рассчитанной на излучение среднего ИК-диапазона (3 - 5 мкм).

Полученные результаты показали, что побочные порядки дифракции ощутимо влияют на частотно-контрастную характеристику (ЧКХ) для бесконечно удалённой точки на оси только на низких пространственных частотах, но приводят к образованию пьедестала в дифракционном изображении, что может быть причиной образования гало. Однако, если ДЭ дифракционной микроструктуры не опускается ниже 0.67, то побочные порядки не приведут к ощутимому снижению качества изображения.

Данный вывод был подтверждён и для рефракционно-дифракционной двухкомпонентной оптической системы с HGAL в качестве фронтального компонента и с встроенной германиевой линзой ИК-видеокамеры НТРА80х64d в качестве второго компонента. Хроматизм положения и сферохроматизм этой двухкомпонентной оптической системы примерно в 3 и 6 раз превосходят соответствующие aberrации одиночной HGAL, достигая уровня типичного для ИК-оптики среднего ценового диапазона, что позволяет говорить об общности полученных результатов.

Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование рефракционно-дифракционной двухкомпонентной оптической системы проводились также в двойном спектральном диапазоне. В этом случае при моделировании и в эксперименте использовалось тепловое излучение, подобное излучению абсолютно чёрного тела. Цветовая температура излучателя выбиралась так, что максимум его спектральной плотности энергетической светимости приходился на $\bar{\lambda} = 4$ мкм. При этом на границах учитываемого при компьютерных расчётах спектрального диапазона $2 \leq \lambda \leq 8$ мкм нормированная спектральная плотность энергетической светимости источника и дифракционная эффективность микроструктуры лежали в интервалах 0.22 – 0.40 и 0.0004 – 0.37 соответственно. В этом случае негативное влияние побочных дифракционных порядков также практически незаметно на фоне других превалирующих факторов, первым в ряду которых является хроматизм положения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

Список литературы

1. Greisukh G.I., Ezhov E.G., Kazin S.V., Stepanov S.A. // Journal of Optical Technology. 2016. V. 83. № 3. P. 159.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.edmundoptics.com/p/25mm-dia-x-15mm-fl-3-5mum-coated-hybrid-ge-aspheric-lens/22946/>.

Н.Е. МИРОШНИКОВА, П.А. ТИТОВЕЦ, В.И. ЛИПАТКИН,
А.Н. КУЛЕШОВ

Московский технический университет связи и информатики

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Приведены результаты экспериментальных исследований подводного оптического канала связи длиной 4.6 м. Было проведено измерения частотного отклика как при передаче оптического сигнала по подводному каналу, так и по воздуху. Также была измерена зависимость ОСШ от частоты.

N.E. MIROSHNIKOVA, P.A. TITOVETS, V.I. LIPATKIN,
A.N. KULESHOV

Moscow Technical University of Communications and Informatics

EXPERIMENTAL STUDY OF UNDERWATER OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION LINK

Presents the results of an experimental study of underwater wireless optical link. Operational distance length 4.6 m. Underwater optical wireless link and free space optical link frequency response are obtained. Based on the results of calibration measurements, the dependence E_S / N_0 at the output of the matched filter from the transmission frequency was obtained.

Появление в водной среде искусственных сооружений, в частности, нефте- и газодобывающих структур вызвало необходимость непрерывного контроля их поведения и соответственно автономных датчиков способных накапливать и передавать информацию на пункты её обработки. Оптические подводные системы связи являются альтернативой акустическим системам, позволяя реализовывать более высокоскоростные линии связи. В настоящее время такие системы способны передавать данные со скоростью до 7 Гбит/с [1-5].

Целью работы является экспериментальное исследование подводного оптического канала связи. Экспериментальная установка состоит из передающего модуля, трубы, заполненной водой, длиной 4.6 м, и приёмного модуля. В качестве излучателя используется синий лазерный диод, длина излучаемой волны 450 нм, мощность 150 мВт. Отличием предложенного решения от существующих, является модуляция лазера по

интенсивности радиосигналом. Приёмный модуль построен на базе лавинного фотодиода.

В результате экспериментов была получена передаточная характеристика мощности сигнала от частоты, при прохождении через воду и воздух, представленная на рис. 1. С помощью платы STEMlab была получена зависимость ОСШ от частоты, представленная на рис. 2. Неравномерность тракта в полосе 70 МГц составила не более 9 дБ.

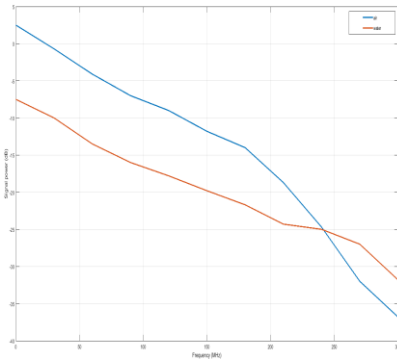


Рис. 1. Зависимость мощности сигнала (дБ) от частоты

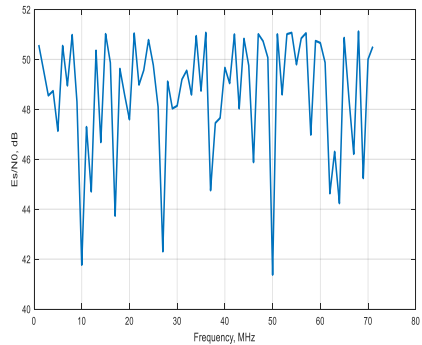


Рис. 2. Зависимость ОСШ от частоты

Список литературы

1. Doniec M., Detweiler C., Vasilescu I., Rus D. Using optical communication for remote underwater robot operation // Proc. IEEE / RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst. 2010. P. 4017-4022.
2. Araújo J.H., et al. 5.36 Gbit/s OFDM optical wireless communication link over the underwater channel // 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). 2020. P. 1-4.
3. Zhan L., et al. High-speed multi-user underwater wireless optical communication system based on NOMA scheme // Proc. 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). 2020. P. 1-2.
4. Zhao Y., Chi N. Partial pruning strategy for a dual-branch multilayer perceptron-based post-equalizer in underwater visible light communication systems // Opt. Express. 2020. V. 28. P. 15562-15572.
5. Miroshnikova N.E., Petruchin G.S., Sherbakov A.V., Titovce P.A. A statistical model of the propagation of optical radiation in the hydrosphere // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). 2020. P. 1-6.

Р.В. РОМАШКО, Ю.Н. КУЛЬЧИН, Д.В. СТОРОЖЕНКО,
М.Н. БЕЗРУК

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

ВЕКТОРНО-ФАЗОВАЯ ОПТОВОЛОКОННАЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Разработана и экспериментально реализована адаптивная лазерная векторно-фазовая гидроакустическая измерительная система, которая обеспечивает определение полного вектора акустической интенсивности. Проведены экспериментальные исследования разработанной измерительной системы в задаче определения пеленга и локализации источника слабого гидроакустического поля.

R.V. ROMASHKO, Yu.N. KULCHIN, D.V. STOROZHENKO,
M.N. BEZRUK

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok

VECTOR-PHASE FIBER-OPTIC HYDROACOUSTIC SYSTEM

An adaptive laser vector-phase hydroacoustic measuring system is developed and experimentally implemented. The developed system provides determination of the full vector of acoustic intensity. Experimental studies of the developed measuring system performance in the tasks of determining the bearing and localization of the source of a weak hydroacoustic field is carried out.

В настоящей работе представлена многоканальная лазерная адаптивная векторно-фазовая оптоволоконная гидроакустическая система (ВФОГС) [1], позволяющая определение скалярных и векторных параметров акустического поля. Приёмный элемент системы состоит из шести разнесённых в пространстве волоконно-оптических датчиков катушечного типа (рис. 1а). Датчик цилиндрической формы выполнен из экструдированного пенополистирола с намотанным многомодовым волоконным световодом длиной 5 м. Размещение датчиков парами на концах отрезков, ориентированных вдоль трёх ортогональных осей пространства (X, Y, Z), обеспечивает измерение трёх компонент градиента давления. Расстояние между датчиками в каждой паре определяет рабочий диапазон частот, который для представленной реализации ВФОГС составляет 100 - 1500 Гц. Фазовая демодуляция сигналов, полученных на выходе датчиков, осуществляется с помощью шестиканального адаптивного голографического интерферометра, построенного на основе

фоторефрактивного кристалла CdTe, в котором формируются шесть динамических голограмм [2]. Продемонстрирована возможность ВФОГС определять местоположение неподвижного источника сигнала с частотой 900 Гц по измерениям в нескольких точках пространства вектора акустической интенсивности (рис. 1б и 1в). Результаты измеренного азимутального угла совпали с расчётным с точностью до 4° . В рамках дополнительных испытаний разработанной ВФОГС, проведён эксперимент по определению пеленга на движущийся источник сигнала с частотой 900 Гц в режиме реального времени. При временной дискретизации измерений 0,35 с погрешность определения азимутального угла (рис. 1г) составила 3° .

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00323).

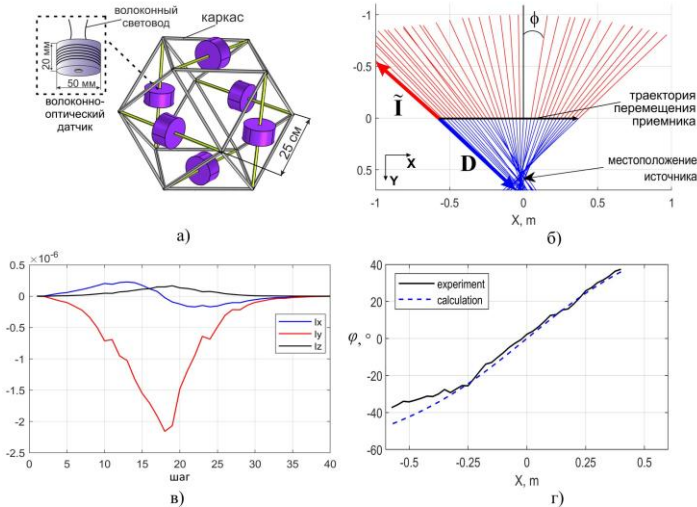


Рис. 1. Схема приёмного элемента и результаты экспериментальных исследований ВФОГС в задаче определения местоположения акустического источника: схема приёмного элемента (а); измеренные единичные векторы интенсивности \tilde{I} и векторы пеленга D на гидроакустический источник (б); – временная диаграмма трёх проекций I_x , I_y и I_z вектора интенсивности I (в); диаграмма азимутального угла φ на гидроакустический источник (г)

Список литературы

1. Гордиенко В. Векторно-фазовые методы в акустике. Litres, 2018.
2. Stepanov S.I. Applications of photorefractive crystals // Reports on Progress in Physics. 1994. V. 57. P. 39.

В.М. ЕПИХИН, П.В. КАРНАУШКИН¹, А.В. РЯБИНИН,
М.М. МАЗУР, Л.И. МАЗУР

*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

¹*Пермский государственный национальный исследовательский университет*

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ- ЧАСТОТОСДВИГАТЕЛИ С ВОЛОКОННЫМИ ВЫВОДАМИ

Разработаны акустооптические модуляторы-частотосдвигатели с волоконными выводами, работающие как в традиционной однокристалльной схеме, так и в двухкристалльной схеме с компенсацией углового дрейфа светового пучка в рабочей полосе управляющего сигнала. Измерены основные параметры модуляторов: оптические потери, контраст, полоса рабочих частот, время готовности.

V.M. EPIKHIN, P.V. KARNAUSHKIN¹, A.V. RYABININ,
M.M. MAZUR, L.I. MAZUR

*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements,
Mendeleevo, Moscow region*

¹*Perm State National Research University*

FIBER PIGTAILED ACOUSTOOPTICAL MODULATORS – FREQUENCY SHIFTERS

Fiber pigtailed acoustooptical modulators – frequency shifters have been developed that work both in a traditional single-chip circuit and in a dual-crystal circuit with compensation for the angular drift of the light beam in the frequency band of the control signal. The main parameters of the modulators were measured: optical losses, extinction, operating frequency band and rise time.

Востребованность акустооптических (АО) устройств, встраиваемых в волоконно-оптические линии (ВОЛ), обусловлена преимуществами закрытых оптических трактов: физическая и информационная защита от внешнего воздействия, надежность и стабильность параметров, гибкая компоновка оптических узлов в сложных схемах.

Цель данной работы – разработка модуляторов-частотосдвигателей с одномодовыми волоконными выводами (АОМВ) и экспериментальное исследование их параметров.

На рис. 1 показаны схемы разработанных АОМВ: однокристалльного (1) и двухкристалльного с компенсацией углового дрейфа пучка [1] (2), а также выражения для полосы рабочих частот этих устройств Δf [2]. Здесь $K1$,

$K2$ – коллиматоры; АОЯ – акустооптическая ячейка; П – поляризатор, D – диаметр сердечника волокна, V – скорость акустической волны, F – фокусное расстояние коллиматора, λ – длина волны света, α – угловая апертура коллиматора $K2$, $\Delta f_{\text{согл}}$ – полоса согласования пьезопреобразователя [1].

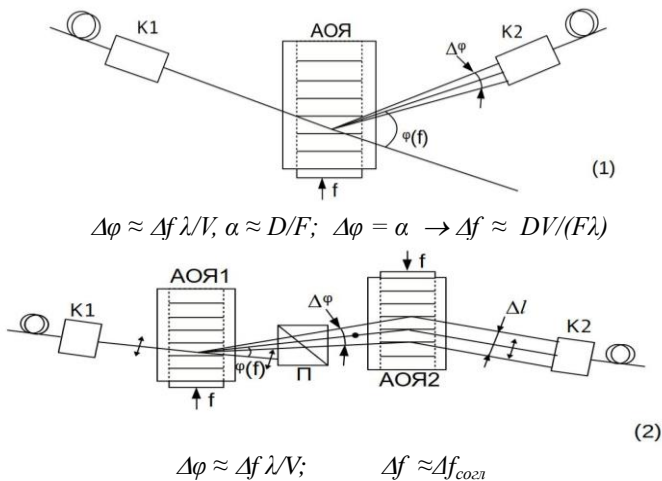


Рис. 1. Схемы разработанных АОМВ: традиционного (1) и двухкристалльного (2)

Вторая схема обеспечивает существенно большую полосу сдвига, так как однокристалльный частотосдвигатель при изменении частоты изменяет угол падения на выходной коллиматор $\Delta\varphi(f)$, а двухкристалльный частотосдвигатель осуществляет параллельный сдвиг светового пучка $\Delta l(f)$.

Список литературы

1. Мазур М.М., Мазур Л.И., Шорин В.Н., Рябинин А.В. Двухкристалльный акустооптический модулятор. Патент на изобретение RU 2703930, 22.10.2019. Заявка № 2019108913 от 27.03.2019.

2. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. М. Советское Радио, 1978.

Д.В. ОБЫДЕННОВ^{1,2}, К.Б. ЮШКОВ¹, В.Я. МОЛЧАНОВ¹

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ ЛОВУШКИ С КОЛЬЦЕВЫМ ПОТЕНЦИАЛОМ

В работе предложена система оптической ловушки с кольцевым полем, основанная на неколлинеарном акустооптическом фильтре. Пространственная фильтрация углового спектра лазерного пучка в радиальном направлении обеспечивается геометрией двумерной передаточной функции фильтра. Управление пространственным распределением поля осуществляется за счёт многочастотного адаптивного управления акустооптическим фильтром.

D.V. OBYDENNOV^{1,2}, K.B. YUSHKOV¹, V.Ya. MOLCHANOV¹

¹National University of Science and Technology MISIS, Moscow

²Lomonosov Moscow State University

DESIGN OF AN OPTICAL TRAP WITH ANNULAR POTENTIAL

We propose an optical trapping system with annular potential based on a noncollinear acousto-optic tunable filter. Spatial filtering of the laser beam angular spectrum along the radial coordinate is owing of the geometry of the filter transfer function. Controlling of the spatial field distribution is performed by multifrequency adaptive controlling of the acousto-optic filter.

Акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) на кристалле парателлурита находят широкое применение в современной оптике и фотонике в первую очередь как программируемые спектральные фильтры. При этом АОПФ является пространственно-инвариантным фильтром, характеризуемым двумерной передаточной функцией. Двумерная передаточная функция неколлинеарного АОПФ имеет кольцевую форму, определяемую геометрией волновых поверхностей обыкновенной и необыкновенной волн в кристалле [1].

При фиксированной длине волны лазерного излучения ширина кольца передаточной функции АОПФ определяется частотой ультразвука, что позволяет управлять угловым спектром дифрагировавшего излучения. Многочастотное управление фильтром позволяет синтезировать различные радиальные распределения лазерного поля и адаптивно управлять ими. Прямой синтез радиосигнала для управления АОПФ осуществляется на основании преобразования Фуренеля с

оптимизированными спектральными и временными параметрами радиосигнала [2, 3]. При этом одним из фундаментальных ограничений является асимметрия двумерной передаточной функции АОПФ [4].

Новая схема оптической ловушки с кольцевым потенциалом основана на прямом управлении спектром лазерного пучка с помощью неколлинеарного АОПФ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Излучение лазера на длине волны 532 нм фокусируется Фурье-линзой в АОПФ, оптимизированном и изготовленном специально для данной задачи в НТУЦ Акустооптики НИТУ «МИСиС». Система переноса изображения обеспечивает необходимый коэффициент преобразования углового спектра для согласования ширины двумерной передаточной функции АОПФ с числовой апертурой светосильного микрообъектива ($40 \times / 0,95$). Микрообъектив выполняет роль второй Фурье-линзы, преобразуя сформированный фильтром угловой спектр пучка в пространственное распределение поля в фокальной плоскости. Формирование многочастотного радиосигнала осуществляется программируемым генератором сигналов произвольной формы на основании дисперсионного алгоритма [3].

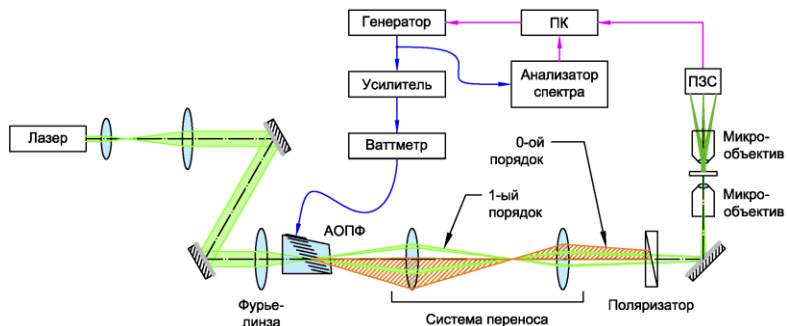


Рис. 1. Схема оптического пинцета с кольцевым полем

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант 20-12-00348).

Список литературы

1. Balakshy V.I. // Appl. Opt. 2018. V. 57(10). P. C56.
2. Yushkov K.B., et al. // Opt. Lett. 2019. V. 44(6). P. 1500.
3. Юшков К.Б. // Известия Вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62(11). P. 875.
4. Yushkov K.B., et al. // Appl. Opt. 2020. V. 59(28). P. 8575.

А.Ю. БЫКОВСКИЙ

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

ИЗБЫТОЧНЫЕ ДАННЫЕ В МНОГОЗНАЧНО-ЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕТЕВОГО АГЕНТА

В коммуникационных сетях традиционно стремятся свести к минимуму дублирующие и избыточные данные, относя их к информационному шуму. Однако задача интеграции квантовых технологий и мультиагентных робототехнических систем требует использования методик, основанных на использовании избыточной информации для коррекции ошибок приёма данных и проверок полномочий агентов. В этих целях удобно применить модели многозначной логики, упрощающие обработку недостоверных данных.

A. Yu. BYKOVSKY

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

DATA REDUNDANCY IN MULTIPLE-VALUED LOGIC MODEL OF A NETWORK AGENT

In communication networks redundancy and dubbing data are usually regarded as information noise which is to be minimized. However the task of integration of quantum technologies and multiagent robotic systems into networks needs to use schemes exploiting redundancy data for errors corrections and access verifications. Appropriate method here is to apply multiple-valued logic modeling, which simplifies the processing of unreliable data.

Развитие перспективных видов коммуникационных волоконно-оптических сетей сопряжено с интеграцией квантовой криптографии, квантовых вычислений и мультиагентных систем автономных роботов [1, 2], что усложняет системы и заставляет минимизировать избыточные данные. С другой стороны избыточная и дублирующая информация необходима для помехозащищённой передачи сигналов, защиты информации и коррекции ошибок в моделях управления.

Цель работы заключается в демонстрации методики верификации избыточных зашумлённых данных в задаче коммуникации двух агентов реализуемой на базе многозначной алгебры Аллена-Живона [2].

Рассматривается случай передачи классических данных в условиях сильных помех и шума (рис. 1). Для обработки зашумленного сигнала обсуждается модель логического классификатора на базе МЗЛ функции,

где с учётом уровня внешнего шума на нескольких оптических частотах осуществляется передача / приём нескольких коррелированных дублирующих сообщений, кодируемых с использованием динамической сетки. Известная обоим агентам сетка приёма / передачи используется для накопления достаточно убедительного набора достоверно определённых фрагментов. При реализации такой схемы для приёмного устройства следует заранее подобрать набор логических термов произведения вида $C * X_1(f_1) * \dots * X_N(f_N)$, где комбинация полных и неполных наборов литералов $X_j(f_j)$ с разными константами C позволит во втором каскаде обработки принять решение по интерпретации данных.

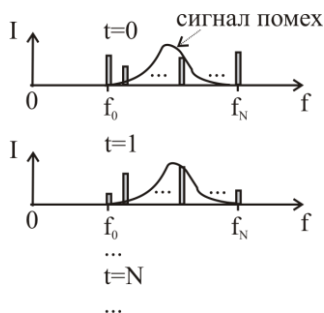


Рис. 1. Накопление распознаваемых фрагментов спектра передаваемого сигнала (неквантового) на фоне сильного сигнала помех в течение N временных отсчётов

В случае динамического приёма квантово-оптических сигналов вместо амплитудного спектра передаваемых частот f_0, \dots, f_n потребуется обработать массив событий регистрации одноквантовых сигналов. Например, для известного квантового алгоритма $D.Unruh$ потребуется вводить дополнительные логические переменные для описания квантовых величин, будет отличаться схема временной синхронизации и могут потребоваться дополнительно квантовые избыточные данные. Однако общий принцип обработки будет близок к классической схеме.

Рассматриваемая методика ориентирована на использование схем позиционно-зависимой криптографии, случайного предсказателя и гетерогенной логической модели сетевого агента [2].

Список литературы

1. Jadid A.O., Hajinezhad D. // arXiv:1908.03963v3. 14 Jun 2020.
2. Bykovsky A.Yu. // Quantum Reports. 2020. V. 2(1). P. 126-165.

А.В. ПАВЛОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИИ ФУРЬЕ: ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ НА ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ

Дана модель принятия решений как выбора альтернатив, реализуемого *6f*-схемой голографии Фурье кольцевой архитектуры. Показано, что выбор определяется фильтрацией и радиусом автокорреляции образа, записанного на голограмме, хранящей правило принятия решения по модели монотонной логики.

A.V. PAVLOV

ITMO University, Saint-Petersburg

MODELING OF DECISION MAKING BY HOLOGRAPHIC TECHNIQUE: NONLINEARITY OF HOLOGRAMS RECORDING PLAYS A MAJOR ROLE

A model of decision making, implemented by *6f* Fourier-holography setup, is proposed. It is shown, the decision is determined by both: filtration and the length of correlation of the pattern, recorded by the hologram, stored the rule for decision making.

Одна из важных задач информационных технологий – моделирование принятия решения как выбора альтернатив. Решение этой задачи человеком традиционно рассматривается в контексте таких атрибутов, как свобода воли, нравственность и мораль. Эти вопросы относятся к философским, но для построения искусственной системы они должны быть переведены на язык технических терминов и параметров. В докладе на примере антагонистической игры «Дилемма заключённого» показано, что выбор лицом, принимающим решение (ЛПР) одной из двух альтернатив обусловлен индивидуальными характеристиками сенсорной системы и нейронной сети ЛПР – дополнительной фильтрацией, как следствием нелинейности экспозиционных характеристик сенсоров и голографических регистрирующих сред (синаптических контактов).

Наш подход основан на представлении задачи логикой с исключением, реализуемой *6f* схемой голографии Фурье [1] (рис. 1). Схема адекватна модели трёхслойной нейросети кольцевой архитектуры, соответствующей нейрофизиологической концепции «кольца восприятия» [2] и реализует когнитивный диссонанс как ключевой атрибут принятия решения в игре.

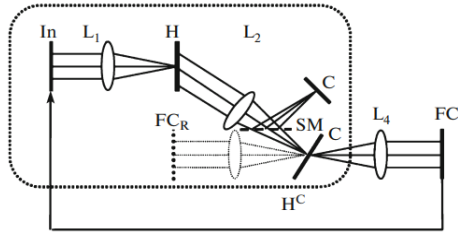


Рис. 1. $6f$ -схема голографии Фурье: L_1, L_2, L_3, L_4 – фурие-преобразующие линзы, H и H^C – голограммы основного правила и исключения, In и C – плоскости входная и корреляций, SM – светоделитель, FC_R – эталон для записи H^C

В игре ЛПР должен выбрать одну из двух альтернатив: C (молчать) или D (передать) при условиях: а) решение подельника ему неизвестно, б) известно, что подельник молчит. На рис. 2 даны зависимости Ω : отношения вероятностей «D» при условии б) к «D» в ситуации а) от меры различия альтернатив V – отношения полуширин спектров «C» и «D».

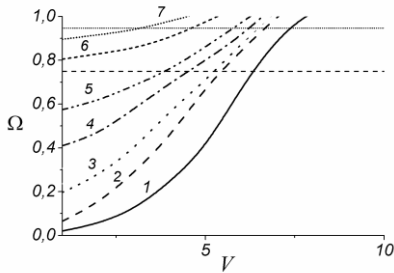


Рис. 2. Зависимости Ω от V для ряда радиусов АКФ: 1 – 4.5 пкс., 2 – 8.5, 3 – 9, 4 – 13, 5 – 16, 6 – 23, 7 – 30; горизонтальные линии – диапазон Ω , наблюдавшихся в социальных экспериментах

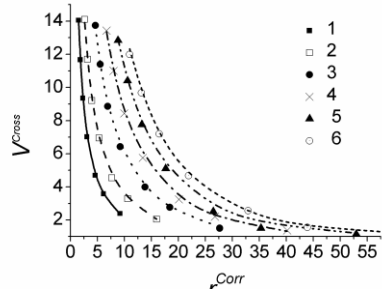


Рис. 3. Зависимости точки равновесия от радиуса корреляции образа логического правила для RF: 1 – 0, 2 – 2, 3 – 4, 4 – 6, 5 – 8, 6 – 10

На рис. 3 даны численные и аналитические зависимости точки равновесия V^{Coss} , соответствующих $\Omega = 1$, от радиуса корреляции записанного на голограмме образа логического правила для ряда отношений полуширин спектра образа и фильтра RF. Видно, что выбор альтернативы зависит от внутренней репрезентации правила ЛПР.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 18-01-00676-а.

Список литературы

1. Pavlov A.V. // Optics. and Spectroscopy. 2015. V. 119(1). P. 146-154.
2. Иванецкий А.М. // Журнал высшей нервной деятельности. 1996. Т. 46. № 2. С. 241-252.

Е.К. ПЕТРОВА, Р.С. СТАРИКОВ, Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ
Национальный исследовательский ядерный институт «МИФИ»

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО КОРРЕЛЯЦИОННОМУ РАСПОЗНАВАНИЮ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Приведены результаты экспериментов корреляционного распознавания цветных изображений взятых из произвольных источников. Практическая постановка задачи предполагает, что входное тестовое изображение может иметь произвольные характеристики по размеру, разрешению и качеству съёмки.

E.K. PETROVA, R.S. STARIKOV, E. Yu. ZLOKAZOV
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

EXPERIMENTS ON CORRELATION RECOGNITION OF IMAGES OBTAINED BY THE FROM ARBITRARY SOURCES

The results of experiments on correlation recognition of color images taken from arbitrary sources are presented. The practical formulation of the problem assumes that the input test image can have arbitrary characteristics in terms of size, resolution and quality of shooting.

Показано применение инвариантных фильтров (ИФ) [1, 2] с использованием изображений из произвольных открытых источников, например сети «Internet» или полученных фоторегистраторами с различным разрешением. Целью работы является исследование возможностей применения ИФ в практических постановках задач.

Данная постановка задачи предполагала классификацию различных объектов на «истинный» и «ложные» объекты. В основе ИФ лежал тренировочный набор фотографий масштабной модели «истинного» объекта [3]. Тестовые наборы были сформированы следующим образом:

- набор изображений «истинного» объекта, сформированный из произвольных источников («Т1:Real-256»);
- набор изображений «истинного» объекта, полученный с помощью различных фоторегистраторов («Т5:FF-256»);
- набор изображений объектов, не имеющих общих элементов с истинным объектом, сформированный из произвольных источников. («CVi: Real-256»);

• набор изображений объектов с элементами сходными с истинным объектом, сформированный из произвольных источников («MEi:Real-256» и «Ti:Real-256»).

Изображения объектов могло было представлено как в полутонном режиме, так и в режиме выделения цветовой информации. Были получены следующие результаты:

- для случая «T1:Real-256» и «T1:FF-256» получены узкие и высокие корреляционные пики, которые позволяют классифицировать объект как истинный;
- для случая «MEi:Real-256» и «Ti:Real-256» характеристики полученных корреляционных пиков обеспечивают только возможность обнаружения без возможности классификации;
- для случая «CVi:Real-256» характеристики полученных корреляционных пиков, при использовании цветовой информации, позволяют классифицировать объект.

Примеры корреляционных пиков представлены на рис. 1. Здесь все результаты показаны для случая полутонных изображений. В качестве численных критериев использовалось сочетание высоты корреляционного пика и его ширины на полувысоте и 2/3 высоты.

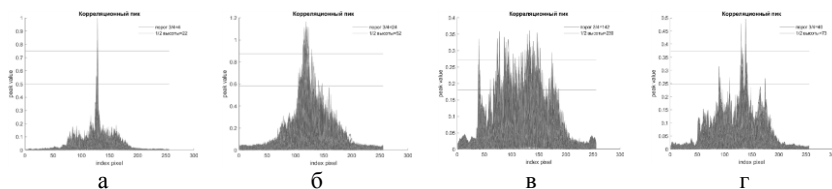


Рис. 1. Вид корреляционных пиков для различных «объектов интереса»: «T1:Real-256» (а), «T1:FF-256» (б), «MEi:Real-256» (в) и «CVi:Real-256» (г)

Список литературы

1. Vijaya Kumar B.V.K., Mahalanobis A., Juday R. Correlation Pattern Recognition. New York: Cambridge University Press, 2005.
2. Kerekes R.A., Vijaya Kumar B.V.K. Selecting a composite correlation filter design: a survey and comparative study // Optical Engineering. 2008. V. 47(6).
3. Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Петрова Е.К. и др. Инвариантные фильтры с минимизацией шума и энергии корреляции: исследование дискриминационных характеристик в различных постановках задачи распознавания // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 11/3. С. 123-127.

А.В. КРАЙСКИЙ, Т.В. МИРОНОВА
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ОЦЕНКА УПОРЯДОЧЕННОСТИ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

Проведена оценка однородности мезопористого фотонного кристалла по электронной фотографии его поверхности. Получено разбиение поверхности кристалла на домены с помощью корреляционной обработки цифрового изображения. В качестве численной характеристики упорядоченности системы пор вычисляется оценка среднего и максимального размера домена, а также доля регулярных структур в изображении.

A.V. KRAISKY, T.V. MIRONOVA
Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

ESTIMATION OF PORE ORDERING OF PHOTONIC CRYSTAL SURFACE

The homogeneity of a mesoporous photonic crystal is estimated from an electronic photograph of its surface. The division of the crystal surface into domains is obtained using the correlation processing of a digital image. As a numerical characteristic of the ordering of the pore system, an estimate of the average and maximum domain size, as well as the proportion of regular structures in the image, is calculated.

Большое внимание в литературе уделяется изготовлению, исследованию и применению фотонных кристаллов. В частности, среди разнообразия исходных материалов, особенно выделяется оксид алюминия, при анодировании которого можно получать упорядоченную сотообразную пористую структуру из вертикальных каналов [1, 2].

Обычно пористая структура упорядочена не по всей поверхности, а разбивается на «домены» с различной ориентацией регулярной структуры. Кроме того, в структуре могут присутствовать дефекты, и может варьироваться расстояние между порами. Для оценки качества полученной поверхности по её электронно-микроскопическому изображению используются подходы двух типов – это либо разбиение на элементарные треугольные ячейки на базе диаграмм Вороного [1], либо оценка образца как целого по его автокорреляционной функции [3]. Мы предлагаем метод, лежащий на стыке этих двух подходов, свободный от их недостатков. Разделение изображения на домены с различной

ориентацией системы пор производится с помощью метод цифровой корреляции изображений [4, 5]. Поскольку данный метод чувствителен к повороту объекта, корреляционным сканированием изображения можно выявить области с определённой ориентацией структуры расположения пор. На рис. 1 показан участок изображения, содержащий 1 домен, эталонный элемент и функция корреляции эталонного элемента с этим участком. Диаметр пор 80 нм, период 110 нм. Видно, что максимумы корреляционной функции расположены внутри границ домена соответствующей ориентации.

В реальной ситуации углы поворота системы пор могут быть произвольными, но оказалось, что для оценки качества поверхности достаточно рассматривать четыре типа ориентации структуры, обобщая данные в пределах пятнадцати градусов [6]. Пример подобного разбиения изображения [2] на домены показан на рис. 2. При этом вычисляются наглядные числовые характеристики качества поверхности фотонного кристалла: общая доля регулярных структур (для данного изображения 80 %), средний и максимальный линейный размер домена (0,47 и 2,3 мкм соответственно) [6].

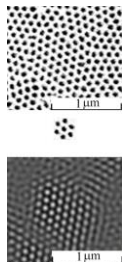


Рис. 1. Участок исходного изображения, эталонный элемент и вид корреляционной функции для соответствующей ориентации эталона

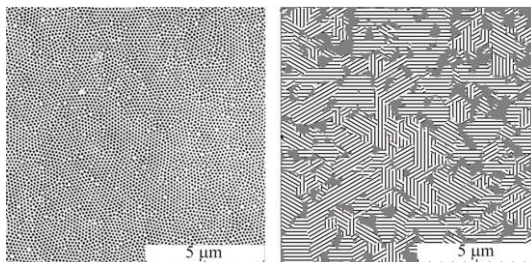






Рис. 2. Исходное изображение [2] и разбиение его на домены разной ориентации:  - 0 ± 5 град,  - 15 ± 5 град,  - 30 ± 5 град,  - 45 ± 5 град, ровно окрашенные серые области соответствуют нарушению структуры из-за дислокаций и на границах доменов [6]

Список литературы

1. Roslyakov I.V., Koshkodaev D.S., et al. // J. Phys. Chem. C. 2016. V. 120. P. 19698-19704.
2. Горелик В.С. и др. // Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. № 2.
3. Pourfard M., Faez K., Tabaian S.H. // J. Phys. Chem. C. 2013. V. 117. P. 17225-17236.
4. Tropea C., Yarin A.L., Foss J.F. // Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin: Springer, 2007.
5. Borkova V.N., et al. // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2006. No. 7. P. 38-41.
6. Крайский А.В, Миронова Т.В. // Оптика и спектроскопия (послано в печать).

И.П. ГУРОВ, М.А. ВОЛЫНСКИЙ, Н.Б. МАРГАРЯНЦ,
А.Ю. ПИМЕНОВ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ДИНАМИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ТРЁХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКОГО КОГЕРЕНТНОГО ТОМОГРАФА В РЕЖИМЕ АСИНХРОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

Приведены результаты исследования внутренней микроструктуры объектов методом оптической когерентной томографии во временной области. Показано, что использование режима асинхронного сканирования с динамической обработкой данных позволяет визуализировать микроструктуру полупрозрачных неоднородных объектов в видеорежиме с высоким быстродействием.

I.P. GUROV, M.A. VOLYNSKY, N.B. MARGARYANTS,
A.Yu. PIMENOV

ITMO University, Saint-Petersburg

DYNAMIC EVALUATION OF 3D OBJECT STRUCTURE USING OPICAL COHERENCE TOMOGRAPHY IN ASYNCHRONOUS SCAN MODE

Results of objects internal micro structure investigation using a time-domain optical coherence tomography system are presented. It has been shown that asynchronous scanning mode with dynamic data processing allows to visualize a micro structure of semitransparent nonuniform objects in video mode with high speed.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) как метод оптического неразрушающего получения информации о внутренней микроструктуре различных объектов представляет актуальную область исследований. При этом важны характеристики быстродействия аппаратных средств, реализующих высокопроизводительные алгоритмы обработки данных. Современные системы спектральной ОКТ с перестраиваемыми по длине волны источниками излучения позволяют исследовать локальные изменения структуры объектов во времени с высокой чувствительностью [1] и с высоким быстродействием при 3D визуализации микрообъёма [2]. В настоящей работе предлагается использовать менее сложную и дорогостоящую корреляционную систему

ОКТ для динамической визуализации микрообъёма с обеспечением повышенной разрешающей способности.

На рис. 1 представлена фотография экспериментальной установки на основе схемы микроинтерферометра Линника с системой освещения на базе суперлюминесцентного диода ($\lambda_{\text{ср}} = 842 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 60 \text{ нм}$) и широкопольными объективами ($\text{NA} = 0,1$, рабочий отрезок 5 мм). Режим асинхронного сканирования реализуется путем перемещения образца на однокоординатной вертикальной платформе позиционирования PI M-501 без синхронизации с регистрирующей последовательность видеокadres видеокамерой IDS UI 3060CP. Для динамической обработки данных использовались рекуррентный алгоритм на основе расширенного фильтра Калмана [3] и адаптивный фильтр Винера [4]. На рис. 2 приведён пример восстановленной микроструктуры тест-объекта в виде крыла комара.

Исследования показали, что разработанная ОКТ-система имеет высокую разрешающую способность до 3,4 мкм по глубине при скорости отображения данных до 72 мегавокселей/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 19-79-10118).

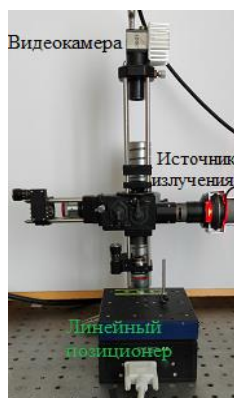


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки

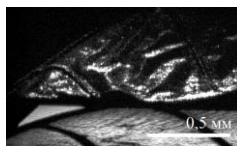
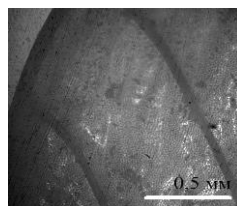


Рис. 2. Кадр из серии изображений и 3D-томограмма участка крыла комара

Список литературы

1. Alexandrov S.A., Subhash Y.M., et al. // *Nanoscale*. 2014. V. 6 (7). P. 3545.
2. Carrasco-Zevallos O.M., Keller B., et al. // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 31689.
3. Gurov I.P., Volynsky M.A. // *Opt. Las. Eng.* 2012. V. 4. P. 514.
4. Гуров И.П., Капанова В.О. // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87(11). С. 31.

А.М. КОЖЕВНИКОВА¹, А.С. ИВАНКОВ¹,
И.В. АЛЕКСЕЕНКО^{1,2}, Д.В. ШИТЦ¹

¹*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград*
²*Институт лазерных технологий в медицине и измерительной технике, Ульм, Германия*

ЦИФРОВАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ НЕТЕРМАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ

Предложен метод и описан автоматизированный комплекс цифровой голографической интерферометрии, разработанный для исследования параметров струи нетермальной плазмы, генерируемой в импульсном режиме. Рассмотрены особенности синхронизации регистрирующих устройств с генерацией импульсов плазмы. Также представлены результаты наблюдения импульса плазмы, полученные методами цифровой голографической интерферометрии.

А.М. KOZHEVNIKOVA¹, А.С. IVANKOV¹,
I. V. ALEKSEENKO^{1,2}, D. V. SHITZ¹

¹*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*
²*Institute for Laser Technology in Medicine and Measurement Technique, Ulm, Germany*

DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY FOR NON-THERMAL PLASMA PULS ANALYSIS

In this report we propose a method of digital holographic interferometry and automated laboratory unit developed to determine the parameters of non-thermal plasma jet in pulse mode. The peculiarities of recording devices synchronization with the plasma pulses are considered. The results of plasma pulse detection and phase maps corresponding to refractive index changing are also represented.

В настоящее время в терапии септических осложнений или дерматитов различной этиологии находит применение воздействия на кожные покровы или раны струи нетермальной плазмы. Однако методы определения дозы воздействия плазмы в различных режимах её генерации с учётом определения концентрации электронов не разработаны в полной мере. Известным методом исследования таких параметров является интерференционный метод [1 - 3]. В предлагаемой статье описан метод цифровой стробоскопической голографической интерферометрии (рис. 1),

позволяющий проводить наблюдение и анализ импульсной генерации струи плазмы длительностью 750 нс и частотой 5 кГц. Исследуемый динамический процесс требует оптимальной синхронизации системы захвата изображения, генерации лазерного излучения и генерации плазмы. Синхронизация и управление устройствами осуществлялась с использованием программно-аппаратных средств National Instruments. Регистрация изображений осуществлялась по схеме записи голограмм сфокусированного изображения. Расчёт интерференционных полос, соответствующих разности фаз между двумя состояниями объекта, осуществлялся методом фурье-анализа. В работе представлены результаты регистрации плазменной струи как фазового объекта (рис. 2). Полученные интерференционные изображения позволяют, в дальнейшем, оценить концентрацию электронов через определение показателя преломления плазмы и разработать методику дозированного воздействия плазмы при терапии кожных и септических заболеваний.

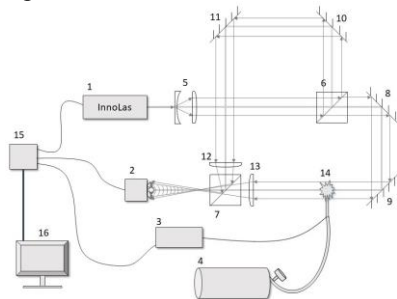


Рис. 1. Схема цифрового голографического комплекса для исследования потока плазмы в импульсном режиме генерации

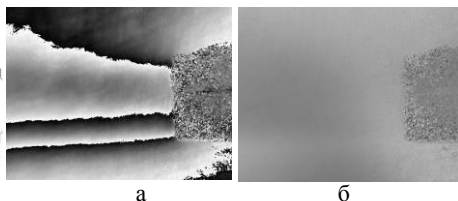


Рис. 2. Изменения фазы излучения в момент генерации плазмы: относительно воздуха (а), относительно потока гелия (б)

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки РФ № FZWM-2020-0003 «Исследование новых материалов и методов плазмо- и фототерапии онкологических заболеваний, дерматитов и септических осложнений» 2020-2023 гг.

Список литературы

1. Centurion M., et al. Holographic recording of laser-induced plasma // Optics letters. 2004. V. 29. № 7. P. 772-774.
2. Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Y.I. Holographic methods of plasma diagnostics // Progress in optics. Elsevier, 1985. V. 22. P. 197-270.
3. Зайдель А.Н. Применение голографической интерферометрии для диагностики плазмы // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 5. С. 105-138.

П.П. СОКОЛОВ, Н.Д. ВОРЗОБОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ДИФРАКЦИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ

Исследованы дифракционные и селективные свойства объёмных и гибридных структур при падении излучения в широком диапазоне углов применительно к задаче получения дифракционных дефлекторов солнечных концентраторов.

P.P. SOKOLOV, N.D. VORZOBOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

DIFFRACTIVE ELEMENTS FOR HOLOGRAPHIC SOLAR CONCENTRATORS

The diffraction and selective properties of volume and hybrid structures at incidence of radiation in a wide range of angles are investigated as applied to the problem of obtaining diffractive deflectors for solar concentrators.

В последние годы проявляется большой интерес к задаче получения голографических солнечных концентраторов. В имеющихся публикациях [1 - 4] предложен ряд решений, однако, имеются недостатки, связанные с диапазоном углов падения, используемыми материалами и дифракционными свойствами элементов. Кроме того, в большинстве работ свойства структур рассматриваются при падении излучения в одной плоскости. Особенностью данной работы является исследование свойств периодических структур при падении излучения в широком диапазоне углов в трёхмерном пространстве.

Структуры записывались в попутных пучках в промышленных фотополимерных материалах Baufol HX и акрилатных композициях. Исследовались свойства объёмных решёток и гибридных структур – объёмных решёток с поверхностным рельефом. Измерения дифракционной эффективности (ДЭ) проводились по двум схемам. Первая схема – традиционная. При измерениях по второй схеме решётка в исходном положении устанавливается так, что диэлектрические плоскости параллельны плоскости стола, изменяется угол α , а также угол поворота решётки в перпендикулярном направлении – угол β .

При измерениях по традиционной схеме контур угловой селективности классический с полушириной единицы градусов. Измерения по второй схеме выявили более интересные закономерности. При падении излучения в брэгговской плоскости максимальная ДЭ (80 %) сохраняется в диапазоне углов α до 40° , т.е. профиль угловой селективности существенно уширяется (рис. 1).

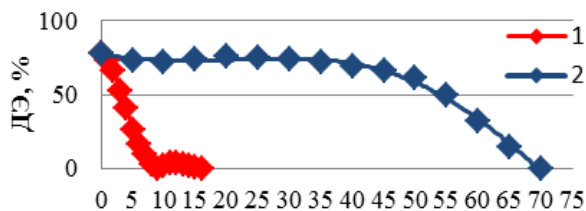


Рис. 1. Контур угловой селективности объёмной решётки при измерениях по традиционной схеме (1) и в брэгговской плоскости (2)

Установлено также, что при отклонении от брэгговской плоскости - изменении угла β , максимум ДЭ смещается в сторону больших углов α – до 70° и сохраняются при углах β до 40° . Это означает, что в решётке существует множество направлений распространения излучения, отличных от классического брэгговского направления, при которых ДЭ максимальна. Этот результат является важным и решает проблему использования солнечного излучения при больших углах падения.

Исследование свойств гибридных структур выявило их существенное преимущество по диапазону углов β – до 60° . Применительно к задаче получения дифракционных дефлекторов это означает, что гибридные структуры обеспечивают высокие дифракционные свойства не только при движении солнца в течение дня, но и при изменении его высоты над горизонтом в течение года без отслеживания траектории. Оценка сигнала фотоячейки с учётом траектории движения солнца показала преимущество использования объёмных структур в утреннее и вечернее время и гибридных структур в весенний и осенний периоды.

Список литературы

1. Ferrara M.A., Striano V., Coppola G. // Appl. Sci. 2019. V. 9. P. 193.
2. Akbari H., Naydenova I., Martin S. // Appl. Opt. 2014. V. 53 (7). P. 1343-1363.
3. Castro J.M., Zhang D., Myer B., Kostuk R.K. // Appl. Opt. 2010. V. 49 (5). P. 858-870.
4. Pen E.F. // Optoelectron., Instrum. Data Process. 2019. V. 55(3). P. 271-279.

Р. ИСМАИЛ, Д.Е. ПИСКУНОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ВАРИОСИСТЕМА НА БАЗЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫХ ЛИНЗ

Численный метод определения законов изменения оптических сил перестраиваемых линз многокомпонентной вариосистемы на основе разложения по базисным функциям применён для синтеза вариообъектива на базе трёх перестраиваемых линз. Рассмотрены различные базисные функции, выбрано оптимальное число членов разложения.

R. ISMAIL, D.E. PISKUNOV

Bauman Moscow State Technical University

VARIOSYSTEM BASED ON TUNABLE-FOCUS LENSES

Numerical method for determining the laws of change in the optical powers of tunable lenses of a multicomponent variosystem using the expansion basis functions is applied for synthesis of a zoom lens with three tunable lenses. Different types of basis functions are considered, the optimal number of expansion terms is chosen.

Оптические системы с переменными оптическими характеристиками широко применяются в различных областях науки и техники [1]. Традиционным способом получения переменных оптических характеристик является перемещение компонентов системы с помощью сложных и дорогостоящих механизмов. Такие механизмы являются ограничивающим фактором при использовании в малогабаритных устройствах, например, камерах мобильных телефонов. Но перемещение компонентов не является единственным способом изменения оптических характеристик, этого можно достичь также путем изменения оптической силы перестраиваемых линз [2]. Изменение оптической силы линз может быть обеспечено как путем варьирования радиуса кривизны поверхности жидкой линзы, так и показателя преломления материала [3].

Жидкие линзы предназначены для работы в очень широком диапазоне оптических сил (фокусных расстояний) на высоких скоростях. Благодаря исключению движущихся частей и механических регулировок, обычно встречающихся в вариообъективах, процесс фокусировки происходит быстрее. Этот тип линз может быть использован в системах переменного увеличения и автофокусировки, в дифракционно-ограниченных системах оптической записи, в осветительных системах [4].

В общем случае, габаритный расчёт вариосистемы сводится к решению системы нелинейных уравнений $P(x_1, \dots, x_n) = P_t$, где x_1, \dots, x_n – конструктивные параметры P_t – вектор параксиальных величин. Например, для оптимизации положения линз и их оптической силы система уравнений будет записана следующим образом: $P(d, \varphi) = P_t$, где d – расстояния между компонентами; φ – оптическая сила линзы. В случае двухлинзовых систем с компонентами переменной оптической силы существует аналитическое решение, описывающие характеристики системы (фокусное расстояние, увеличение и т. д.) [5]. Однако в случае более сложных систем, содержащих как компоненты с фиксированным фокусным расстоянием, так и перестраиваемые компоненты, аналитическое решение может отсутствовать, поэтому необходимо решать систему уравнений численными методами. В работе обсуждается численный метод решения системы нелинейных уравнений с использованием интерполяции и разложения по базисным функциям. Целью оптимизации в этом случае является определение коэффициентов разложения и конструктивных параметров, обеспечивающих наилучшее качество системы в соответствии с оценочной функцией. Используя этот метод, был выполнен габаритный синтез вариообъектива, включающего три перестраиваемые линзы. Проанализированы различные типы базисных функций: степенные функции, многочлены Чебышева; выбрано оптимальное число членов разложения. На основе теории аберраций третьего порядка разработана начальная система для оптимизации. С помощью коммерческого программного обеспечения для оптических расчётов выполнена оптимизация рассчитанной системы. Разработанный вариообъектив отличается высокими оптическими характеристиками.

Список литературы

1. Рожков О.В., Пискунов Д.Е., Носов П.А., Павлов В.Ю., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Особенности теории и практики научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана «Разработка вариосистем» // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 1. С. 72-83.
2. Nosov P.A., Piskunov D.E., Vinogradov M.A., Tigeaev V.O., Yablokova A.A. Calculation of the optical variosystems with tunable optical power lenses // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1421. № 1. P. 012038.
3. Piskunov D.E., Danilova S.V., Tigeaev V.O., Borisov V.N., Popov M.V. Tunable lens for AR headset // Proc. SPIE. 2020. V. 11350. P. 113500F.
4. Hendriks B.H., Kuiper S., van As M.A., Renders C.A., Tukker T.W. Variable liquid lenses for electronic products // Proc. SPIE. 6034. 2006. V. 6034. P. 603402.
5. Miks A., Novak J. Analysis of two-element zoom systems based on variable power lenses // Optics express. 2010. № 18 (7). P. 6797-6810.

А.А. КАЛИНИНА¹, А.Н. ПУТИЛИН

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

¹*Московский физико-технический институт*

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

КЛИНОВИДНЫЕ ВОЛНОВОДЫ В ИЗОБРАЖАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ

Приведены результаты разработки и моделирования непланарного волноводного оптического элемента для применения в устройствах дополненной реальности. Мы разработали компактное оптическую систему устройства, в основе которого лежит использование клиновидного волновода в комбинации с объёмной отражательной голограммой. Устройство обладает полем зрения 73 градуса по горизонтали и разрешением 10 лин/мм в центральном поле.

A.A. KALININA¹, A.N. PUTILIN

Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),*

Dolgoprudny

WEDGE LIGHTGUIDE IN IMAGING SYSTEMS

We present the results of development and modelling of non-planar waveguide optical element for imaging application. We developed a compact augmented reality device, which operation is based on combination of wedge curved waveguide with volume reflective hologram. This system has horizontal field of view 73 degrees and resolution 10 lines per millimeter at central field.

Устройства очков дополненной реальности с каждым годом становятся всё более компактными и совершенными. Основными элементами, позволяющими сделать устройство компактным и с высокими выходными характеристиками, являются волноводные и голографические оптические элементы [1]. В данной работе мы представляем систему, построенную с использованием обеих технологий.

Целью данной работы является разработка компактного устройства дополненной реальности с широким полем зрения на базе волновода. Планарные волноводы обычно используются в очках дополненной реальности для размножения выходного зрачка оптической системы [2]. Однако, поле зрения в таких устройствах не превышает 40 - 45 ° ввиду ограничений по условиям полного внутреннего отражения. В связи с этим мы предлагаем вместо планарного волновода использовать изогнутый,

клиновидный. Такая форма волновода позволяет преодолеть ограничения и сформировать систему с полем зрения выше 70° .

Волновод в такой схеме представляет собой подложку с внешней цилиндрической поверхностью – и с внутренней поверхностью описываемой полиномами Цернике. В волновод вводятся узкие коллимированные пучки с полем зрения 38° – такое изображение формируют сканирующие лазерные проекторы. Распространяясь внутри волновода, каждый луч достигает точки с координатами (x, y) , в которой нарушается полное внутреннее отражение и луч выводится из волновода под углом, близком к скользющему. Форма волновода рассчитана таким образом, чтобы лучи на выходе были коллимированными. Для перенаправления лучей в зрачок используется объёмная голограмма, которая работает из точки в точку и расположена на расстоянии 1 мм от внешней поверхности волновода (рис. 1), при этом пространство между волноводом и голограммой может быть заполнено как воздухом, так и иммерсионной средой с низким показателем преломления.

В данной схеме происходит преобразование углового распределения лучей на входе в волновод – в пространственное распределение лучей на выходе из волновода. Это свойство может быть использовано для создания широкоугольных компактных изображающих систем. В данном случае мы разработали систему, которая обладает полем зрения 73° , а разрешение для центральной области сетчатки составляет 10 линий/мм (рис. 2).

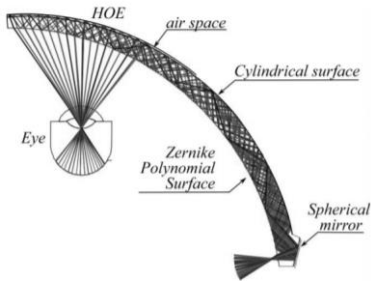


Рис. 1. Оптическая система на основе изогнутого клиновидного волновода и объёмной голограммы

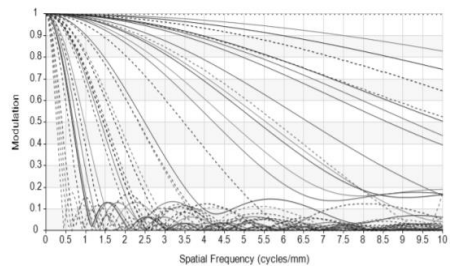


Рис. 2. Частотно-контрастная характеристика

Список литературы

1. Kress B.S. // Proc. SPIE. 2019. V. 11062. P. 0J1-0J26.
2. Путилин А.Н., Морозов А.В. и др. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. С. 1694-1702.

М.В. ШИШОВА, С.Б. ОДИНОКОВ, А.Ю. ЖЕРДЕВ,
Д.С. ЛУШНИКОВ, В.В. МАРКИН

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ЗАПИСЬ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЁТОК С ПОМОЩЬЮ ФАЗОВЫХ МАСОК ДЛЯ СВЕТОВОДОВ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Представлено исследование механизма записи мультиплексных брэгговских дифракционных решёток для световодных дисплеев по методу оптического копирования с применением фазовой маски. Световоды в данном эксперименте были изготовлены из фототерморефрактивного стекла. В качестве фазовой маски использовалась фоторезистивная рельефно-фазовая дифракционная решётка, нанесённая на световодную пластину. На основе исследований по угловому мультиплексированию реализован компактный дисплей дополненной реальности.

M.V. SHISHOVA, S.B. ODINOKOV, A.Yu. ZHERDEV,
D.S. LUSHNIKOV, V.V. MARKIN

Bauman Moscow State Technical University

RECORDING OF MULTIPLEX BRAGG GRATINGS USING PHASE MASK FOR AUGMENTED REALITY DISPLAYS

The paper presents a study of the mechanism of recording the multiplex Bragg diffraction gratings for optical augmented reality displays using the method of optical copying with a phase mask. The lightguides in this experiment were made of photo-thermo-refractive glass. A photoresist relief-phase diffraction grating deposited on the planar lightguide plate was used as the phase mask. Based on research on angle multiplexing, a compact augmented reality display was implemented.

В представленном исследовании, механизм записи волноводных брэгговских дифракционных решёток основан на нескольких последовательных экспонированиях фазовой маски и анализируется для сбалансированного согласования параметров угловой ширины полосы и дифракционной эффективности получаемых объёмных дифракционных решёток. Пространственное мультиплексирование изменяет углы наклона объёмной брэгговской решётки в дифракционных волноводных ответвителях, чем помогает расширить эффективное угловое поле зрения в окологлазных дисплеях. Метод записи с применением фазовой маски реализует задачу оптического копирования рельефно-фазовой

дифракционной решётки в объёмную среду и создания брэгговской дифракционной решётки. Исследование отличается наклонным освещением одиночным регистрирующим пучком «сэндвича» из фазовой маски и световодной пластины.

Структурные параметры каждой мультиплексированной решётки оптимизированы в соответствии с расчётными направлениями распространения [1]. Дифракционная эффективность отдельной решётки при N -кратном мультиплексировании уменьшается примерно в N раз, что подтверждается измерениями на рис. 1 для однократной записи, а также пяти и десяти последовательных экспозициях. Для волновода из фототерморефрактивного стекла толщиной 2 мм достижима дифракционная эффективность 10 - 20 % в каждом из 10 мультиплексов [2]. В описанном эксперименте, для задачи ввода и вывода изображения в дисплее дополненной реальности из фототерморефрактивного стекла толщиной 2 мм оптимально использовать голограммы с семикратным мультиплексированием.

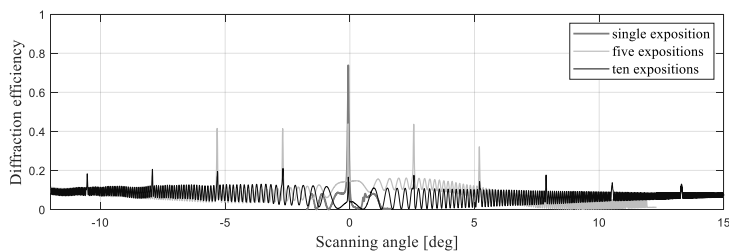


Рис. 1. Угловая характеристика дифракционной эффективности для мультиплексных брэгговских решёток, записанных с помощью фазовой маски

Запись с использованием фазовой маски обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартной интерференционной записью: с помощью фазовой маски легче реализовать высокие углы сведения записывающих пучков углы схождения представляют собой углы дифракции; плоский равномерный волновой фронт должен быть создан только для одной ветви; запись всей площади дифракционного волновода регистрируется одновременно; требования к виброустойчивости установки записи снижены.

Список литературы

1. Odinkov S B., et al. // Optics Express. 2020. V 8. № 12. P. 17581-17594.
2. Shishova M.V., et al. // Photonics. 2021. V. 7. Is. 4.

Э.К. ФАЗАЛОВА, К.В. КОЧУНОВ, Е.В. БОДЯГО,
Г.А. КОНОПЛЕВ, Н.В. МУХИН, И.М. СОКОЛОВА,
Д.А. ЧИГИРЕВ, А.В. ЗИМИНОВ¹, Л.И. РУДАЯ¹, Г.К. ЛЕБЕДЕВА²
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

¹*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)*

²*Институт высокомолекулярных соединений РАН, Санкт-Петербург*

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕНСИБИЛИЗИРОВАННОГО ФТАЛОЦИАНИНОМ ПОЛИ (О-ГИДРОКСИАМИДА) КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Приведены результаты экспериментов по исследованию оптических и фотоэлектрических свойств поли (о-гидроксиамида) (ПОА), сенсibilизированного фталоцианинами цинка, в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

E.K. FAZALOVA, K.V. KOCHUNOV, E.V. BODYAGO,
G.A. KONOPLEV, N.V. MUKHIN, I.M. SOKOLOVA,
D.A. CHIGIREV, A.V. ZIMINOV¹, L.I. RUDAYA¹, G.K. LEBEDEVA²
Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"

¹*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*

²*Institute of Macromolecular Compounds of the RAS, Saint-Petersburg*

INVESTIGATION OF OPTICAL AND PHOTOELECTRIC PROPERTIES OF POLY (O-HYDROXYAMIDE) SENSITIZED BY PHTHALOCYANINE AS A PERSPECTIVE MATERIAL FOR SOLAR CELLS

The results of experiments on the study of the optical and photoelectric properties of poly (o-hydroxyamide) (PHA) sensitized with zinc phthalocyanine in the visible and near infrared spectral regions are presented.

Сенсибилизированные красителем солнечные элементы (DSSC) обычно используют в качестве фоточувствительного компонента красители на основе рутения из-за их широкого спектра оптического поглощения, но низкие молярные коэффициенты экстинкции и высокая

стоимость синтеза ограничивают их дальнейшее применение в DSSC [1]. Красители на основе фталоцианинов имеют большое преимущество в отношении подвижности носителей заряда и фотоэлектрических свойств за счёт изменения модификации молекулярных структур с различными центральными атомами металлов и замещающими группами [2].

Целью данной работы является изучение оптических и фотоэлектрических свойств поли (о-гидроксиамида) (ПОА), сенсibilизированного фталоцианином цинка (ZnPc), в видимой и ближней инфракрасной областях. На рис. 1 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения трёх образцов одинаковой толщины 2.3 мкм, но разной концентрацией ZnPc (0 %, 1.87 %, 3.7 %).

Увеличение концентрации красителя в исходном растворе приводит к росту поглощения в диапазоне 600 - 800 нм, при этом в спектрах поглощения наблюдаются пики в коротковолновой и длинноволновой областях. Предположительно, в коротковолновой части поглощение связано с матрицей ПОА [3], а в длинноволновой – с введением сенсibilизатора, что приводит к появлению Q-полос поглощения [4].

Измерение фототоков в планарных структурах при облучении плёнок сверхяркими светодиодами на длине волны 630 нм (рис. 2), соответствующий пику поглощения ZnPc, показали фотопроводимость, связанную с органическим красителем; фототок также наблюдался при облучении на длине волны 540 нм, предположительно из-за поглощения в матрице ПОА.

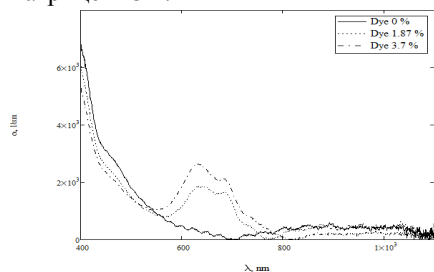


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента поглощения ПОА

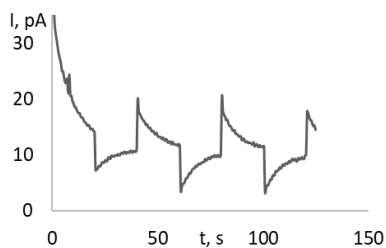


Рис. 2. Сквозной ток при облучении на длине волны 630 нм образца с концентрацией ZnPc 1.87 %

Список литературы

1. He J., Wang B., et al. // *Org.-metal. And Rel. Molec. for Ener. Conv.* 2015. V. 23.
2. Wöhrle D., Schnurpfeil G., et al. // *Macroheterocycles.* 2012. V. 5. P. 191.
3. Bursian A.E., Klimova N.V., et al. // *Phys. Solis State.* 2008. V. 50. P. 557-561.
4. Islam Z.U., Tahir M., et al. // *Energies.* 2020. V. 13. P. 962.

А.П. СМІРНОВ, М.А. ГОРЯЕВ, А.А. ЛУЖКОВ

*Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург*

ПУТИ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ КРАСИТЕЛЯМИ СТРУКТУРЫ СТЕАРАТ СЕРЕБРА – БРОМИД СЕРЕБРА

Обсуждается сенсibilизация красителями композиционных материалов на основе стеарат серебра – AgBr. Проведён расчёт вклада в спектральную сенсibilизацию красителей, адсорбированных на диэлектрике.

A.P. SMIRNOV, M.A. GORYAEV, A.A. LUZHKOVA

The Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg

DYE SENSITIZATION WAYS OF SILVER STEARATE – SILVER BROMIDE STRUCTURE

The dye sensitization in composed materials based on silver stearate – AgBr is discussed. The spectral sensitization by dyes adsorbed on dielectrics is estimated.

В спектральной сенсibilизации термопроявляемых материалов на основе галогенидов и карбоксилатов серебра [1, 2] могут принимать участие красители, адсорбированные как на фоточувствительном полупроводнике, так и на диэлектрике [2 - 4]. В настоящей работе проведён расчёт вклада красителей, адсорбированных на стеарате серебра, в совокупную спектральную сенсibilизацию композиций.

В термопроявляемых композициях кубические микрокристаллы галогенида серебра размером 0.1 мкм синтезируется на поверхности частиц стеарата серебра в виде вытянутых призм высотой около микрона [5], а оптимальные концентрации адсорбированных красителей почти на два порядка выше, чем при сенсibilизации традиционных галоидосеребряных фотоматериалов [2, 6, 7]. Отношение площадей поверхностей стеарата и галогенида серебра около 30 [5, 8] и в первом приближении на стеарате серебра будет во столько же раз больше адсорбированных молекул красителя. Адсорбированный на стеарате краситель эффективно люминесцирует с квантовым выходом в десятки процентов [3, 9]. Стеарат серебра является прозрачным диэлектриком, соответственно, свет люминесценции находящихся на нем молекул попадает в галогенид серебра.

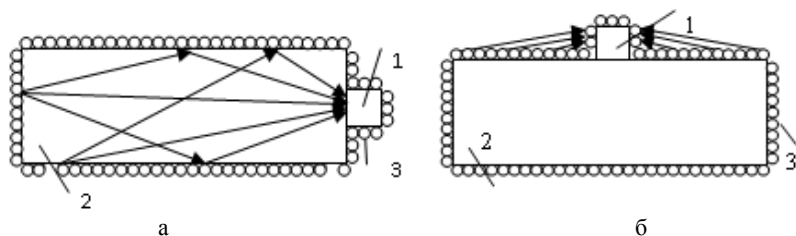


Рис. 1. Схемы спектральной сенсibilизации: световодный механизм (а), прямое попадание люминесценции (б): 1 – галогенид серебра, 2 – стеарат серебра, 3 – молекулы сенсibilизирующего красителя

При расчёте эффективности спектральной сенсibilизации термопроявляемых материалов было установлено, что молекулы красителя, находящиеся на стеарате серебра действительно вносят существенный вклад в процесс сенсibilизации. При этом учитывался и свет, отражаемый от внутренних поверхностей частицы стеарата серебра по световодному механизму (рис. 1а) [4, 8], и прямое попадание света люминесценции молекул красителя, находящихся рядом с микрокристаллом галогенида серебра (рис. 1б). По проведённым расчётам вклад в спектральную сенсibilизацию молекул красителя, находящихся на стеарате серебра составил 40 - 50 % по сравнению с вкладом молекул, находящихся на галогениде серебра. Данный вклад обусловлен как световодным механизмом, так и, даже в значительно большей степени, прямым попаданием люминесценции соседних с галогенидом серебра молекул. Расчёты подтверждают исследования спектральной чувствительности фотослоёв и спектров поглощения красителей, которые показали примерно одинаковые вклады в общий процесс спектральной сенсibilизации красителей, адсорбированных как на галогениде серебра, так и на стеарате серебра [10].

Список литературы

1. Sahyun M.R.V. // J. Imaging Science and Technology. 1998. V. 42. № 1. P. 23.
2. Горяев М.А. Физ. осн. фотохимии тв. тела. Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2013.
3. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Сб. научн. трудов: VIII Межд. конф. по фотонике и информац. оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2019. С. 607.
4. Goryaev M.A., Smirnov A.P. // Physics of Complex Systems. 2020. V. 1. № 1. P. 10.
5. Горяев М.А. // Ж. прикладной химии. 1994. Т. 67. № 6. С. 963.
6. Горяев М.А., Дудников Ю.А. // Ж. научн. и прикл. фотогр. 1990. Т. 35. № 5. С. 386.
7. Горяев М.А., Колесова Т.Б. и др. Технол. и свойства матер. для записи информ. // Сб. научн. трудов НИИХимФотоПроект. М.: 1992. С. 67.
8. Горяев М.А. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 11. С. 40.
9. Горяев М.А., Смирнов А.П. // Изв. РГПУ. 2015. № 173. С. 50.
10. Горяев М.А. // Ж. научн. и прикл. фотогр. 1998. Т. 43. № 3. С. 1.

А.Г. АРЕШКИН, О.С. КОМАРОВА, В.В. ЛЕНТОВСКИЙ,
Д.Л. ФЕДОРОВ

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург*

ВЛИЯНИЕ НЕУПОРЯДОЧЕННОЙ СТРУКТУРЫ ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ A_2B_6 НА ЭКСИТОННЫЕ СВОЙСТВА

Изучено влияние трёхмерного и одномерного беспорядков твердых растворов полупроводников A_2B_6 на их экситонные и свойства.

A.G. ARESHKIN, O.S. KOMAROVA, V.V. LENTOVSKIИ,
D.L. FEDOROV

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
Saint-Petersburg*

INFLUENCE OF DISORDERED STRUCTURE OF A_2B_6 SOLID SOLUTIONS SEMICONDUCTORS ON EXITONIC PROPERTIES

Influence of three-dimensional and one-dimensional disorders in A_2B_6 solid solutions semiconductors on their excitonic properties were investigated.

Твёрдые растворы полупроводников находят широкое применение в оптоэлектронике в качестве активных элементов лазерных электронно-лучевых трубок, материалов для перестраиваемых по частоте лазеров, свето- и фотодиодов, мишеней видиконов, волноводов, так как в этих материалах возможно в широких пределах плавно изменять их физические свойства – параметры кристаллической решётки, ширину запрещённой зоны, эффективные массы носителей, величину расщепление энергетических зон с концентрацией компонент твёрдого раствора.

Были изучены свойства твёрдых растворов полупроводников с замещением в катионной подрешётке $Zn_xCd_{1-x}S$ ($0 < x < 0.15$), $Zn_xCd_{1-x}Se$ ($0 < x < 1$). В ряде этих материалов наблюдается тенденция к политипии и полиморфизму, которая проявляется в образовании как чистых модификаций – сфалерита и вюрцита, так и политипов, а также кристаллов с дефектами упаковки.

Исследовано влияние структурного беспорядка на электронные и экситонные свойства различных твёрдых растворов. Флуктуации состава и неупорядоченное чередование слоёв плотнейшей упаковки (кубических или гексагональных) приводят к возникновению хаотического потенциального рельефа в кристалле, в результате чего меняется функция плотности состояний в разрешённой зоне, а также возникают локализованные состояния в запрещённой зоне.

Флуктуации концентрации твёрдого раствора приводит к хаотическому потенциальному рельефу по всему объёму образца (трёхмерный беспорядок), тогда как случайное чередование кубических и гексагональных слоёв происходит вдоль оси роста кристалла, что приводит к одномерному беспорядку, так как в плоскости слоя структурная модификация остаётся неизменной. Возможное образование кластеров с изменённой модификацией в пределе одного слоя в данной работе не рассматривается. Степень упорядоченности кристаллов плавно меняется с изменением как концентрация твёрдого раствора, так и с изменением содержания хаотически упакованных слоёв (степень анизотропии).

Композиционный и структурный беспорядки в твёрдых растворах оказывают сильное влияние на процессы экситонной люминесценции. В спектрах низкотемпературной люминесценции ($T = 1.6$ К) наряду с характерными для бинарных соединений линиями экситонных комплексов I_1 и I_2 (экситоны, связанные на нейтральном акцепторе и доноре соответственно), наблюдается линия I_L , расположенная между положениями экситонного резонанса и линией излучения связанного экситона I_2 . Обнаружено, что линия I_L соответствует резонансному излучению основного экситона состояния, возмущённого флуктуациями (локализованный экситон).

В твёрдых растворах A_2B_6 с замещением в катионной подрешётке сохраняется миграция электронных возбуждений, о чём свидетельствует одновременное присутствие в спектрах как линий излучения экситонных комплексов, так и линий I_L .

Список литературы

1. Алферов Ж.И., Портной Е.Л., Рычаев А.А., О ширине края поглощения полупроводниковых твердых растворов // ФТП. 1968. Т. 2. № 8. С. 1194-1197.
2. Барановский С.Д., Эфрос А.Л. Размытие краев зон в твердых растворах // ФТП. 1978. Т. 12. № 11. С. 2233-2237.
3. Аблязов Н.Н., Райх М.Э., Эфрос А.Л. Ширина линий экситонного поглощения в твердых растворах // ФТТ. 1983. Т. 25. С. 353-358.

М.А. ЭЛСАЙЕД^{1,2}, Н.В. ДОРОШИНА¹, С.М. НОВИКОВ¹,
А.А. ВИШНЕВЫЙ¹, А.В. АРСЕНИН¹, В.С. ВОЛКОВ¹

¹Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

²Университет Минуфия, Шибин Эль-Ком, Египет

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ВАН-ДЕР-ВААЛЬСОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА

Проведено комплексное исследование комбинационного рассеяния света монослоя дисульфида молибдена (MoS_2), нанесённого на монослои графена и гексагонального нитрида бора (hBN). В работе исследовалось влияние слоя под MoS_2 на две колебательные моды первого порядка MoS_2 (E_{2g} и A_{1g}). Все образцы однослойного дисульфида молибдена были изготовлены методом химического осаждения из газовой фазы (CVD). Исследования проводились при комнатной температуре на различных длинах волн и мощностях лазера.

MARWA ALI EL-SAYED^{1,2}, N.V. DOROSHINA¹, S.M. NOVIKOV¹,
A.A. VYSHNEVYY¹, A.V. ARSENIN¹, V.S. VOLKOV¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny

²Menoufia University, Shebin El-Koom, Egypt

STUDY OF CVD MOLYBDENUM DISULFIDE VAN DER WAALS HETEROSTRUCTURES BASED ON RAMAN SPECTROSCOPY

We present a comprehensive study of the Raman scattering of light of a monolayer molybdenum disulfide (MoS_2) on graphene and h-BN substrates. In this work we examine the effects of the underlying layer on the two first-order vibrational modes of MoS_2 (E_{2g} and A_{1g}). All monolayer (ML) MoS_2 samples were prepared by a chemical vapor deposition technique (CVD). All experiments were carried out using different wavelengths and powers of laser by room temperature.

В последние годы монослои халькогенидов переходных металлов (ХПМ) стали объектом значительного научного интереса. Среди этих материалов MoS_2 занимает особое место как перспективный материал для применения в будущих электронных и оптоэлектронных устройствах [1]. При этом одним из способов расширения сферы использования

двумерных материалов является изготовление композитных гетероструктур, состоящих из чередующихся слоёв двумерных материалов. Такие структуры, называемые ван-дер-ваальсовыми гетероструктурами, иногда демонстрируют необычные физические свойства, не являющиеся тривиальной комбинацией свойств отдельных монослоёв, из которых они состоят [2, 3]. В данной работе выполнено экспериментальное исследование влияния нижерасположенных слоёв гетероструктуры на спектр комбинационного рассеяния MoS_2 . Спектроскопия комбинационного рассеяния является эффективным методом оценки качества тонких плёнок ХПМ, позволяя определить количество атомарных слоёв в плёнке, её натяжение [4] и концентрацию примесей [5]. Для измерений использовался конфокальный сканирующий рамановский микроскоп Horiba LabRAM HR Evolution (HORIBA Ltd., Kyoto, Japan). Все измерения были выполнены с использованием линейно поляризованного лазера с рабочей длиной волны 532 нм, со сбором статистики с различных точек каждого образца. Спектры комбинационного рассеяния гетероструктур MoS_2 , и их оптические изображения представлены на рис. 1.

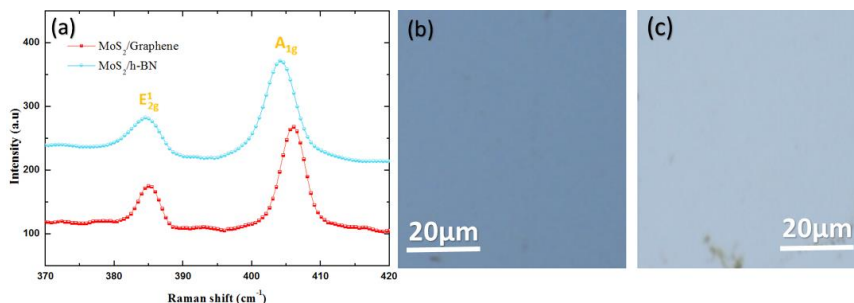


Рис. 1. Спектры комбинационного рассеяния гетероструктур MoS_2 (a), оптические изображения MoS_2 на графене (b) и на hBN (c)

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки России (0714-2020-0002) и РФФИ (18-07-01339, 18-29-02089, 20-07-00475 и 20-07-00840).

Список литературы

1. Ayari A., Cobas E., et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 101. P. 014507.
2. Britnell L, Ribeiro R.M., et al. // Science. 2013. V. 340. P. 1311-1314.
3. Geim A.K., Grigorieva I.V. // Nature. 2013. V. 499. P. 419-425.
4. Kioseoglou G., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 101. P. 221907.
5. Rice C., Young R.J., et al. // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 081307.

Е.В. КУЛЬПИНА, А.Н. БАБКИНА, К.С. ЗЫРЯНОВА
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛИТИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ХРОМСОДЕРЖАЩЕЙ БОРАТНОЙ СТЕКЛОКЕРАМИКИ

В данной работе представлены результаты исследований влияния концентрации лития на люминесцентные свойства боратной наностеклокерамики, содержащей кристаллы $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$. При увеличении концентрации лития увеличивается сила кристаллического поля, действующего на ионы хрома. В связи с этим происходит увеличение квантового выхода и времени жизни люминесценции.

E.V. KULPINA, A.N. BABKINA, K.S. ZYRYANOVA
ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF LITHIUM EFFECT ON THE LUMINESCENT PROPERTIES OF CHROMIUM-DOPED BORATE GLASS-CERAMICS

Presents the results of studies of lithium concentration effect on the luminescent properties of borate nano-glass-ceramics, containing crystals of $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$. As the concentration of lithium increases, the strength of the crystal field experienced by chromium ions increases. In this regard, the quantum yield and the luminescence lifetime increase.

В настоящее время активно изучаются стеклокристаллические материалы, активированные ионами хрома. Ранее было показано [1], что Cr^{3+} в керамике демонстрирует исключительно высокую квантовую эффективность люминесценции по сравнению с таковой в стеклах того же состава. В данной работе в качестве объекта исследования была разработана серия стекол калиево-алюмо-боратной системы следующего состава: $x \text{Li}_2\text{O} - (25 - x) \text{K}_2\text{O} - 25 \text{Al}_2\text{O}_3 - 50 \text{B}_2\text{O}_3$, где $x = 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20$ мол. %. В качестве добавки введена окись хрома 0,1 % Cr_2O_3 .

В ходе проведения изотермической обработки исходного стекла происходит формирование наностеклокерамики на его основе с выделением в матрице нанокристаллической фазы состава $\text{LiAl}_7\text{B}_4\text{O}_{17}:\text{Cr}^{3+}$ [2]. Для изучения влияния содержания лития в составе исходного стекла

на формирование нанокристаллов были проведены исследования люминесцентных свойств полученных стеклокерамик.

В спектре люминесценции всех образцов, за исключением содержащего 0 % Li_2O , наблюдаются три интенсивные полосы, расположенные на 685, 700 и 715 нм, связываемые с ионами Cr^{3+} в кристаллическом окружении. Для каждого образца определён общий квантовый выход и измерено время жизни люминесценции каждой из трёх полос. На рис. 1 и 2 представлены результаты проведённых исследований. Также получены спектры оптической плотности, которые были использованы для расчёта параметра Dq/B , определяющего силу октаэдрического кристаллического поля, действующего на ионы Cr^{3+} .

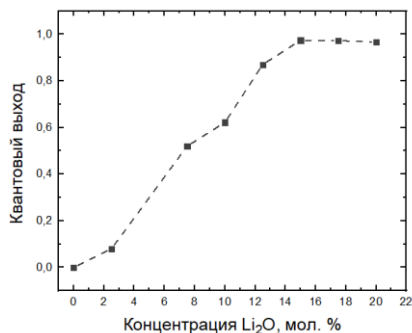


Рис. 1. Зависимость общего квантового выхода люминесценции от концентрации лития

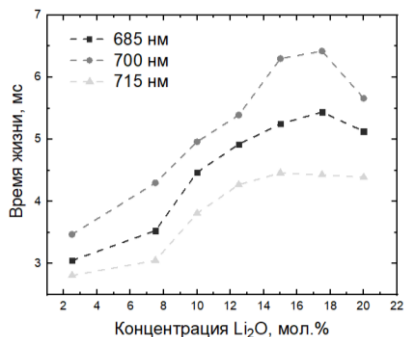


Рис. 2. Зависимость времени жизни разных полос люминесценции от концентрации лития

В результате исследований получено, что при увеличении концентрации лития в составе стекла значение параметра Dq/B увеличивается от 2.25, что характерно для хромсодержащего боратного стекла [3], до 3.08. При этом время жизни люминесценции увеличивается от 3, 3.4, 2.8 до 5.4, 6.4, 4.4 мс для полос 685, 700 и 715 нм соответственно, а общий квантовый выход люминесценции – от 8 до 97 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-72-10036.

Список литературы

1. Reisfeld R., Kisilev A., et al. // J. of Non-Cryst. Sol. 1987. V. 91. P. 333.
2. Babkina A.N., Zyryanova K.S., et al. // J. Non. Cryst. Solids. 2019. V. 521. P. 119487.
3. Rasheed F., et al. // J. Phys.: Condens. Matter. 1991. V. 3. P. 3825.

Д.С. ОВЕЧЕНКО, А.П. БОЙЧЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫМ
ФОРМИРОВАНИЕМ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ
ПО ИХ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

Описана методика управляемого анодирования на примере алюминия по электролюминесценции его формирующегося оксида. Приведены различия РЭМ-изображений последнего по сравнению с условиями его формирования в потенциостатическом режиме.

D.S. OVECHENKO, A.P. BOYCHENKO
Kuban State University, Krasnodar

**ELECTRICAL CONTROL FORMATION OF METAL OXIDES
BY THEIR ELECTROLUMINESCENCE**

Method of controlled anodizing is described using the example of aluminum by the electroluminescence of its forming oxide. Differences in SEM-images of samples for the described and potentiostatic modes are presented.

Генерируемая при анодировании алюминия (Al) и других металлов электролюминесценция (ЭЛ) давно используется как средство контроля формируемой на их поверхности оксидной плёнки и её элементов [1]. Однако это средство играет «пассивную» роль. В настоящей работе даётся описание одного из простейших вариантов автоматизированной реализации анодирования Al под «контролем» ЭЛ, что обеспечивается с помощью обратной связи фотоприёмник–источник тока (ИТ). Для реализации задачи в первом приближении управление ИТ осуществлялось механическим вращением его потенциометра при помощи шагового двигателя (ШД), подключенного к микроконтроллеру Atmega32 через драйвер Easydriver, который осуществлял деление каждого шага 1/8. Шкив ШД механически связан с управляющим потенциометром ИТ через силиконовый демпфер для подавления вибраций. Испытание описанной системы проводилось в условиях, ранее описанных в [2] с использованием дистиллированной воды неконтролируемой температуры. В ходе эксперимента регистрировалась зависимость от времени t плотности тока $J(t) - 1$ и интегральной интенсивности ЭЛ $I(t) - 2$, графики которых представлены на рис. 1а. РЭМ-изображения поверхности полученного в

таким режиме оксида алюминия (Al_2O_3) приведены на рис. 1b, а контрольный вариант Al_2O_3 , полученный в «классических» условиях – на рис. 1c.

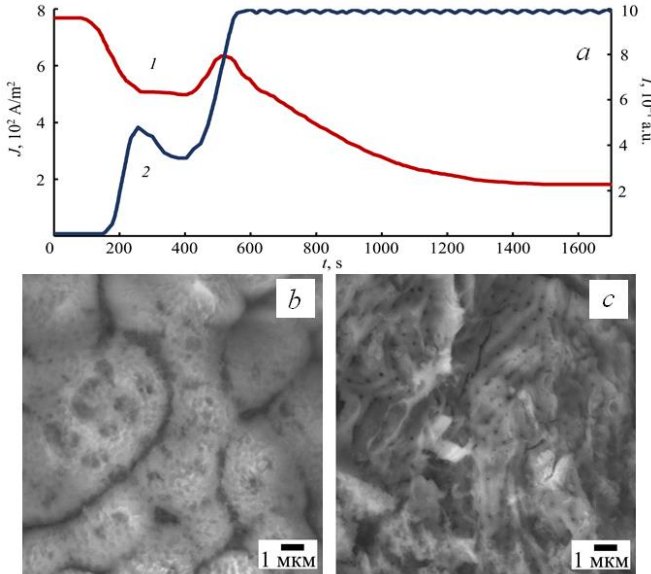


Рис. 1. Зависимости $J(t) - I$, $I(t) - 2$ (a) и РЭМ-изображения поверхности Al_2O_3 при: $I = \text{const}$ (b) и $U = \text{const}$ (c)

Как видно из рис. 1a, при достижении ЭЛ 1 а.е. при токе $\sim 600 \text{ A/m}^2$, устройство начинает управлять последним так, чтобы сохранить $I(t)$ на указанном уровне до конца процесса анодирования. Описанные условия приводят к новому режиму формирования Al_2O_3 , отличному от потенциостатического (U), что и наблюдается в их морфоструктуре (рис. 1b и 1c). Таким образом, в настоящей работе показана потенциальная возможность управления анодированием Al (как и других металлов) по ЭЛ их формирующихся оксидов. В перспективе совершенствования методики предполагается замена механического потенциометра на электронный.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90112.

Список литературы

1. Zeković Lj.D., Urošević V.V., Jovanić B. // Appl. Surface Sci. 1982. V. 11-12. P. 90-99.
2. Овеченко Д.С., Бойченко А.П. // Научный альманах. 2020. № 7-1 (69). С. 126-136.

А.А. МАКУРИН, Е.В. КОЛОБКОВА

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПЕРОВСКИТА ЦЕЗИЯ ВО ФТОРОФОСФАТНОМ СТЕКЛЕ

В данной работе представлены результаты исследований влияние времени термообработки стекла на спектрально-люминесцентные свойства нанокристаллов перовскита цезия (CsPbBr_3). Показано, что при увеличении времени термообработки происходит рост квантовых точек, что приводит к сдвигу полос поглощения и люминесценции в длинноволновую область. Энергетический сдвиг обусловлен проявлением квантово-размерного ограничения нанокристаллов с размерами меньше радиуса экситона Бора.

A.A. MAKURIN, E.V. KOLOBKOVA

ITMO University, Saint-Petersburg

INVESTIGATION OF THE SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF CESIUM PEROVSKITE IN FLUORINE-PHOSPHATE GLASS

Presents the results of studies on the effect of the time of heat treatment of glass on the spectral-luminescent properties of cesium perovskite nanocrystals (CsPbBr_3). It is shown that with an increase in the heat treatment time, quantum dots grow, which leads to a shift of the absorption and luminescence bands to longer wavelengths. The energy shift is due to the manifestation of the quantum confinement of nanocrystals with sizes smaller than the Bohr exciton radius.

Квантовые точки – полупроводниковые нанокристаллы с размерами менее радиуса экситона Бора (7 нм), имеют большие перспективы как материалы фотоники благодаря особым спектрально-люминесцентным характеристикам [1]. Вследствие эффекта квантового пространственного ограничения оптические параметры квантовых точек (энергии полос поглощения и люминесценции) зависят от размеров нанокристаллов. Изменяя их размеры, концентрацию и химический состав, можно получить люминесценцию в широкой области длин волн [2]. В данной работе в качестве объекта исследования было разработано фтор-фосфатное стекло в системе $\text{Ba}(\text{PO}_3) - \text{Na}(\text{PO}_3) - \text{AlF}_3 - \text{Ga}_2\text{O}_3 - \text{BaBr}_2 - \text{Cs}_2\text{O} - \text{PbF}_2$

В результате термической обработки исходного образца при 415 °С изначально практически визуально бесцветное стекло меняло цвет от ярко-зелёного до жёлтого, что связано с ростом нанокристаллов перовскита цезия CsPbBr_3 в стекле. Были проведены исследования изменения спектрально-люминесцентных свойств для образцов одинакового состава.

В спектре поглощения исходного образца наблюдалась резкая граница пропускания, что свидетельствует о формировании малого числа нанокристаллов непосредственно в процессе охлаждения стеклообразного расплава (рис. 1). С увеличением времени термообработки граница поглощения смещается в длинноволновую область. Максимумы полос люминесценции смещаются от 499 (до термообработки) до 506 (30 мин), 509 (60 мин) и 514 нм (90 мин) (рис. 2). Они также смещаются в область меньших энергия. Полосы поглощения располагаются близко полосам люминесценции, что свидетельствует о малых значениях стокова сдвига (около 15 нм) и, следовательно, больших значениях квантового выхода.

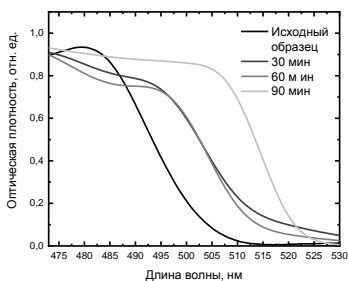


Рис. 1. Спектры поглощения при различном времени термообработки

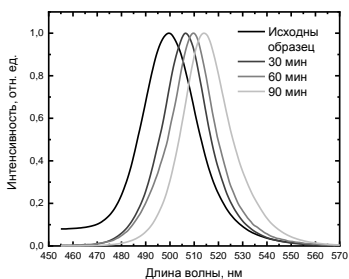


Рис. 2. Спектры люминесценции при различном времени термообработки

В результате исследования показано, что при увеличении термообработки фтор-фосфатного стекла, легированного нанокристаллами перовскита цезия происходит рост квантовых точек, что подтверждается движением полос поглощения и люминесценции в длинноволновую область.

Список литературы

1. William W., Lianhua Yu., et al. // J. Chem. Mater. 2003. V. 15. P. 2854.
2. Bawendi M., Carroll P., et al. // J. of Chem. Phys. 1992. V. 96. P. 946.

Н.В. ДОРОШИНА, О.А. СТРЕЛЕЦКИЙ¹, В.В. СЫЧЕВ²,
А.Б. НЕМЦОВ, М.С. МИРОНОВ, А.А. ВОРОНОВ,
А.В. АРСЕНИН, В.С. ВОЛКОВ, С.М. НОВИКОВ

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный*
¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*
²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

ИОННО-ЛУЧЕВОЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ СЕРЕБРЯНЫХ НАНОСТРУКТУР ДЛЯ СЕНСОРНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В работе представлены результаты исследования плазмонных свойств ансамблей наночастиц серебра ~ 45 нм, сформированных из серебряной плёнки с использованием ионно-лучевой модификации. Оптическая спектроскопия показала, что полученные ансамбли наночастиц серебра сохраняют стабильные плазмонные свойства не менее 39 дней и обладают высоким коэффициентом усиления, который сохраняется в течении более чем одного месяца хранения в окружающей атмосфере. Таким образом, исследуемый метод позволяет получать наночастицы со стабильными плазмонными свойствами и создавать наноструктуры для сенсорных приложений, включая ГКР-активные поверхности.

N. V. DOROSHINA, O. A. STRELETSKIY¹, V. V. SYCHEV²,
A. B. NEMTSOV, M. S. MIRONOV, A. A. VORONOV,
A. V. ARSENIN, V. S. VOLKOV, S. M. NOVIKOV

*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny*
¹*Lomonosov Moscow State University*
²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

ION-BEAM METHOD FOR CREATING SILVER NANOSTRUCTURES FOR SENSOR APPLICATIONS

We present the results of studying the plasmonic properties of ensembles of silver nanoparticles ~ 45 nm formed from a silver film using ion-beam modification. Optical spectroscopy showed that the obtained ensembles of silver nanoparticles retain stable plasmonic properties for at least 39 days due to their monocrystalline nature and also have a strong amplification factor, which is retained for more than one month of storage in the surrounding atmosphere. The research showed that the method of ion-beam modification allows to obtain nanoparticles with stable plasmonic properties and to create nanostructures for sensor applications, including SERS-active surfaces.

Наночастицы (НЧ) серебра демонстрируют превосходные плазмонные свойства и имеют большие перспективы для сенсорных приложений, в то время как быстрое окисление и сульфидирование серебра в окружающей атмосфере вызывает множество трудностей для его практического применения [1]. Ранее было показано, что НЧ серебра, сформированные методом кластерного осаждения, демонстрируют высокую стабильность плазмонных свойств и высокую стойкость к окислению благодаря своей монокристаллической структуре [2, 3]. Мы приготовили НЧ серебра с помощью комбинации двойной системы магнетронного распыления и метода ионно-лучевой модификации; полученные наноструктуры показали стабильность плазмонных свойств. Оптические спектры образцов с ансамблями НЧ серебра представлены на рис. 1.

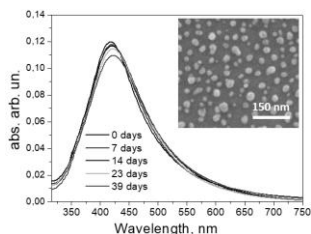


Рис. 1. Прогресс относительного поглощения образца с НЧ Ag в зависимости от времени

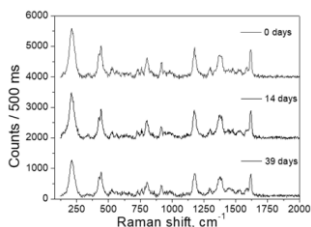


Рис. 2. ГРП спектры с красителем, адсорбированным на ансамблях НЧ серебра

В течение наблюдений было отмечено смещение резонансной полосы в красную область спектра, а через 39 дней интенсивность уменьшилась менее чем на 10 % от начальной. Затем мы сняли спектры комбинационного рассеяния в течение 0, 14 и 39 дней после изготовления. Спектры на рис. 2 демонстрируют относительно схожие интенсивности для образцов с красителем «Crystal Violet», которые хранились в окружающей атмосфере в течение 0 и 14 дней. Интенсивность ГРП, зарегистрированная через 39 дней в окружающей атмосфере, демонстрирует высокую стабильность наночастиц серебра. Таким образом, мы исследовали возможность создавать образцы, используя все преимущества серебра с возможностью его длительного использования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований 20-07-00475, 18-29-02089 и 20-07-00840.

Список литературы

1. Cao W., Elsayed-Ali H.E. // Mater. Lett. 2009. V. 63. P. 2263.
2. Novikov S.M., Popok V.N., Evlyukhin A.B., et al. // Langmuir. 2017. V. 33. P. 6062-6070.
3. Hartmann H., Popok V.N., Barke I.I, et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 073304.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ¹, С.Н. НЕСМЕЛОВ¹, С.М. ДЗЯДУХ¹,
С.А. ДВОРЕЦКИЙ^{1,2}, Н.Н. МИХАЙЛОВ^{1,2}, Г.Ю. СИДОРОВ²

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

ТЕМНОВЫЕ ТОКИ БАРИОДНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ РТУТИ ДЛЯ СРЕДНЕ- И ДЛИННОВОЛНОВЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований темновых токов в средне- и длинноволновых nВn-структурах на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013). Исследована роль поверхностной утечки в nВn-структурах при различных параметрах широкозонных барьерных слоёв и способах пассивации боковых стенок мезаструктур. Для лучших образцов проведено сравнение температурных зависимостей плотностей темнового тока с эмпирической моделью Rule07.

A.V. VOITSEKHOVSKI¹, S.N. NESMELOV¹, S.M. DZYADUKH¹,
S.A. DVORETSKY^{1,2}, N.N. MIKHAILOV^{1,2}, G.Yu. SIDOROV²

¹National Research Tomsk State University

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk

DARK CURRENTS OF BARRIODE STRUCTURES BASED ON MERCURY CADMIUM TELLURIDE FOR MID-WAVE AND LONG-WAVE INFRARED DETECTORS

The results of experimental studies of dark currents in mid-wave and long-wave infrared nBn structures based on HgCdTe grown by molecular beam epitaxy on GaAs (013) substrates are presented. The role of surface leakage in nBn structures has been investigated for various parameters of wide-gap barrier layers and methods of passivation of the side walls of mesa structures. For the best samples, the temperature dependences of the dark current densities are compared with empirical Rule07 model.

Одним из перспективных направлений разработки инфракрасных детекторов является использование архитектур с униполярными барьерами (например, в nВn-конфигурации [1]). В таких детекторах можно добиться снижения темновых токов за счёт подавления компонент, связанных с поверхностной утечкой, а также генерацией Шокли-Рида-Холла в областях пространственного заряда. Значительный интерес

вызывают nВn-детекторы на основе HgCdTe, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), из-за возможностей исключения дефектообразующей процедуры ионной имплантации, которая широко применяется для формирования фотодиодов на основе данного материала. Известно несколько попыток практической реализации nВn-детекторов на основе HgCdTe для средневолнового инфракрасного диапазона (3 - 5 мкм) [2 - 4], но nВn-структуры на основе МЛЭ HgCdTe для длинноволнового диапазона (8 - 12 мкм) ранее изучались только теоретически [5, 6].

В докладе представлены результаты исследования темновых токов первых длинноволновых nВn-структур на основе HgCdTe, выращенных в ИФП СО РАН методом МЛЭ на подложках из GaAs (013). Состав в поглощающем слое составлял 0.20 - 0.21, а состав в барьере от 0.60 до 0.64. Создавались структуры с различными диаметрами (от 20 до 500 мкм) с пассивацией боковых стенок мезаструктур плёнками Al₂O₃, сформированными при помощи плазменного атомно-слоевого осаждения при температуре 120 °С, а также без пассивации.

Измерения темновых токов nВn-структур с различными размерами электрода позволили установить, что плотность тока поверхностной утечки при температуре 300 К и смещении -2 В составляет 0.241 - 0.247 А/см при использовании Al₂O₃ пассивации. Без пассивации плотность тока поверхностной утечки возрастает и находится в диапазоне 0.423 - 0.432 А/см. Установлено, что плотность тока поверхностной утечки возрастает при увеличении обратного смещения. При малых обратных смещениях темновой ток ограничен объёмной компонентой, причём энергия активации этого тока хорошо согласуется с шириной запрещённой зоны поглощающего слоя. При малых обратных смещениях температурная зависимость темнового тока хорошо согласуется с эмпирической моделью Rule07, что свидетельствует о высоком качестве изготовленных структур. Также в широком диапазоне температур проведены исследования адмиттанса nВn-структур и тестовых МДП-приборов на их основе.

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 19-12-00135.

Список литературы

1. Maimon S., Wicks G.W. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 151109.
2. Istuno A.M., Phillips J.D., et al. // J. Electron. Matter. 2012. V. 41. P. 2886.
3. Gravrand O., Boulard F., et al. // J. Electron. Matter. 2015. V. 44. P. 3069.
4. Voitsekhovskii A.V., Nesmelov S.N., et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2020. V. 53. P. 055107.
5. Akhavan N.D., Jolley G., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2015. V. 62. P. 722.
6. He J., Wang P., et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 2020. V. 67. P. 2001.

А.В. КОЛЧИН, С.В. ЗАБОТНОВ, Д.В. ОРЛОВ, Д.В. ШУЛЕЙКО,
Л.А. ГОЛОВАНЬ, Д.Е. ПРЕСНОВ, П.И. ЛАЗАРЕНКО¹,
С.А. КОЗЮХИН², Т.С. КУНКЕЛЬ³, П.К. КАШКАРОВ

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

¹*Московский институт электронной техники, Зеленоград*

²*Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова, Москва*

³*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

ФЕМТОСЕКУНДНОЕ МНОГОИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ АМОРФНЫХ ТОНКИХ ПЛЁНОК Ge₂Sb₂Te₅ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Проведено фемтосекундное лазерное облучение аморфных тонких плёнок Ge₂Sb₂Te₅ на диэлектрических подложках при различных временах экспозиции. Обнаружено, что с её увеличением происходят как обратимые фазовые переходы типа «кристаллическая – аморфная фаза», так и формирование поверхностных периодических структур с близким к длине волны (1.25 мкм) фемтосекундных импульсов периодом.

A.V. KOLCHIN, S.V. ZABOTNOV, D.V. ORLOV, D.V. SHULEIKO,
L.A. GOLOVAN, D.E. PRESNOV, P.I. LAZARENKO¹,
S.A. KOZYUKHIN², T.S. KUNKEL³, P.K. KASHKAROV

Lomonosov Moscow State University

¹*National Research University of Electronic Technology, Zelenograd*

²*Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the RAS, Moscow*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Dolgoprudny*

FEMTOSECOND MULTIPULSE LASER STRUCTURING OF AMORPHOUS Ge₂Sb₂Te₅ THIN FILMS ON DIELECTRIC SUBSTRATES

Femtosecond laser irradiation of amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films on dielectric substrates at the different exposure times was performed. It was revealed, that exposure time growth induces as reversible phase transitions of a type «crystalline – amorphous phase» as fabricating periodic surface structures with the period which is closed to the femtosecond laser pulses wavelength of 1.25 μm.

Активный интерес к халькогенидному стеклообразному полупроводнику Ge₂Sb₂Te₅ (GST225) в качестве материала для создания

устройств энергонезависимой и перезаписываемой памяти обусловлен значительным различием электрофизических и оптических свойств аморфной и кристаллической фазы данного материала [1]. Фемтосекундное лазерное облучение тонких плёнок GST225 позволяет реализовать не только обратимые фазовые переходы, но и может приводить к формированию поверхностных периодических структур (ППС) с волновыми и субволновыми периодами, что является одним из перспективных путей увеличения объёма кодируемой информации в заданном объёме вещества – вокселе [2].

В частности, образование подобных одномерных решёток наблюдалось в результате обработки сверхкороткими лазерными импульсами аморфных тонких плёнок GST225 на проводящих подложках [3], что стимулирует проведение дальнейших исследований уже для образцов на диэлектрических подложках.

Аморфные тонкие плёнки GST225 толщиной 130 нм были осаждены методом магнетронного распыления кристаллической мишени из данного материала на подложки $\text{SiO}_2(1 \text{ мкм})/\text{c-Si}$. Облучение образцов проводилось с помощью фемтосекундной лазерной системы на кристалле хром-форстерита (1250 нм, 135 фс, 10 Гц, 0.1 Дж/см²) в сканирующем режиме. Структурные свойства поверхности исследовались путем анализа данных спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) при длине волны возбуждения 633 нм, а также оптической и растровой электронной микроскопии.

Широкое крыло 110 – 170 см⁻¹ в спектрах КРС подтверждают аморфную структуру исходных образцов [3]. При числе падающих на модифицируемую область лазерных импульсов от 3 до 150 наблюдается частичная кристаллизация облучённых областей, что подтверждается как данными микроскопии, так и появлением узкого пика на волновых числах 110 – 140 см⁻¹ в спектрах КРС. В свою очередь, в режиме облучения от 150 до 750 импульсов происходит формирование ППС с ориентацией, ортогональной поляризации воздействующего излучения. Также при данном режиме структурирования в центре облучённых областей с ростом числа импульсов начинает наблюдаться реаморфизация кристаллизованного при меньшем числе импульсов слоя GST225, наиболее вероятно, свидетельствующая об обратимых фазовых переходах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-90111).

Список литературы

1. Guo P., et al. // Appl. Sci. 2019. V. 9(3). P. 530.
2. Fedotov S.S., et al. // Opt. Lett. 2018. V. 43(4). P. 851.
3. Kozuyukhin S., et al. // Physica Status Solidi B. 2020. V. 257(11). P. 1900617.

А.К. АЙМУХАНОВ, К.С. РОЖКОВА, Т.Е. СЕЙСЕМБЕКОВА
Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ВЛИЯНИЕ СПИРТОВОГО РАСТВОРИТЕЛЯ НА МОРФОЛОГИЮ ПЛЁНОК PEDOT:PSS ПРИ ОТЖИГЕ В ВАКУУМЕ

Представлены результаты исследования морфологии поверхности плёнок PEDOT:PSS. Для изменения морфологии поверхности полимер с дырочной проводимостью PEDOT:PSS разбавляли определённой концентрацией спирта (этиловый, изопропиловый). Преимущества свойств модифицированной плёнки PEDOT:PSS были определены путем сравнения структуры и морфологии поверхности.

A.K. AIMUKHANOV, X.S. ROZHKOVA, A.K. ZEINIDENOV
Karaganda University named after academician E.A. Buketov, Kazakhstan

EFFECT OF ALCOHOLIC SOLVENT ON THE MORPHOLOGY OF PEDOT:PSS FILMS DURING ANNEALING IN VACUUM

This paper presents the results of studying the surface morphology of PEDOT:PSS films. To change the surface morphology, the hole-conducting polymer PEDOT:PSS was diluted with a certain concentration of alcohol (ethanol, izopropanol). The property benefits of the modified PEDOT: PSS film were determined by comparing the structure and surface morphology.

Для изменения морфологии поверхности полимер с дырочной проводимостью PEDOT:PSS разбавляли определённой концентрацией спирта (этиловый, изопропиловый). Преимущества свойств модифицированной плёнки PEDOT:PSS были определены путем сравнения структуры и морфологии поверхности.

Подготовка подложек осуществлялась согласно методике [1]. В работе использовали PEDOT:PSS (1 %, Ossila A14083), Izopropanol, Ethanol (pure 99,9 % Sigma Aldrich). Перед началом экспериментов раствор PEDOT:PSS фильтровали через 0,45 микрометровый фильтр. Плёнки PEDOT:PSS получали на поверхности кварцевого стекла методом центрифугирования (центрифуга SPIN150i) при скорости вращения 5000 об/мин. Топография поверхности исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) JSPM-5400 (JEOL, Япония). Для обработки изображений использовалась программа Win SPMII Data-Processing Software.

Плёнки с разным соотношением спирта отжигали в вакууммированной печи при температуре 120 °С в течение 10 мин. Снимки морфологии поверхности плёнок PEDOT:PSS с разным соотношением спиртов представлены на рис. 1. В табл. 1 приведены значения шероховатости плёнок PEDOT:PSS.

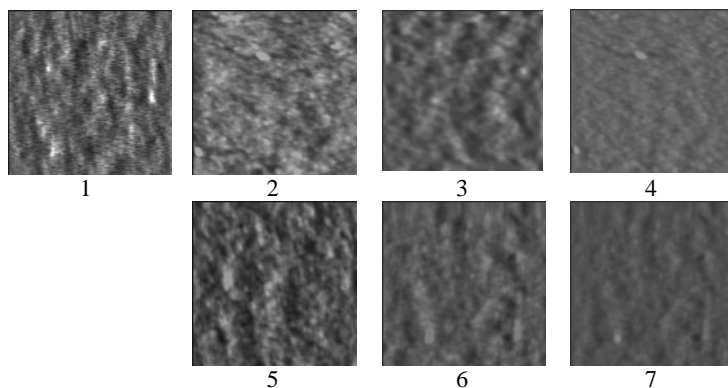


Рис. 1. Снимки морфологии поверхности плёнок PEDOT:PSS: PEDOT:PSS (1); 80 % PEDOT:PSS/20 % ethanol (2); 70 % PEDOT:PSS/30 % ethanol (3); 50 % PEDOT:PSS/50 % ethanol (4); 80 % PEDOT:PSS/20 % isopropanol (5); 70 % PEDOT:PSS/30 % isopropanol (6); 50 % PEDOT:PSS/50 % isopropanol (7)

Таблица 1. Шероховатость поверхности плёнок PEDOT:PSS при разной концентрации спиртов в объёме при отжиге в вакууме

Образец	1	2	3	4	5	6	7
Ra, нм	0,64	0,58	0,54	0,45	0,54	0,49	0,43

Сравнительный анализ показал, что в процессе приготовления плёнки при добавлении различной концентрации ethanol шероховатость поверхности уменьшается в 1,4 раза, а isopropanol – в 1,5 раза.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856176).

Список литературы

1. Kim K., Ihm K., Kim B. Surface property of indium tin oxide (ITO) after various methods of cleaning // Acta Physica Polonica A. Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014. Fethiye, Turkey, 2014. V. 127. № 4.

В.А. КАЗАКОВ, А.В. КОКШИНА, А.Г. РАЗИНА

Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЁНОК УГЛЕРОДА В SP , SP^2 , SP^3 -ГИБРИДИЗИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Исследованы оптические свойства плёнок линейно-цепочечного (карбин), алмазоподобного и аморфного углерода синтезированных ионно-плазменным методом с последующей термической обработкой при различных температурах на воздухе с использованием методов спектрофотометрии.

V.A. KAZAKOV, A.V. KOKSHINA, A.G. RAZINA

Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary

STUDY OF OPTICAL PROPERTIES OF CARBON FILMS IN SP , SP^2 , SP^3 -HYBRIDIZED STATE DURING THERMAL ANNEALING

The optical properties of films of linear-chain, diamond-like and amorphous carbon synthesized by the ion-plasma method with subsequent heat treatment at various temperatures in air using spectrophotometric methods are studied.

Тонкие углеродные плёнки представляют интерес в качестве функциональных слоёв для органических и гибридных фотоэлектрических преобразователей третьего поколения, прозрачных проводящих электродов в электронике, защитных и просветляющих слоёв в оптике [1 - 4]. Из-за различий в химических связях в sp (линейно-цепочечный углерод, карбин), sp^2 (аморфный углерод), sp^3 (алмазоподобный углерод) гибридизированном состоянии термическое окисление плёнок разных аллотропных форм углерода должно происходить по разному.

Целью работы является экспериментальное исследование оптических свойств плёнок линейно-цепочечного, алмазоподобного и аморфного углерода с использованием методов спектрофотометрии при термическом окислении на воздухе при температурах до 400 °С. Образцы плёнок линейно-цепочечного и алмазоподобного углерода получали ионно-плазменным методом, аморфного углерода – катодным распылением в тлеющем разряде аргона. Толщины плёнок составляли менее 200 нм.

На рис. 1 показаны оптические спектры пропускания плёнок линейно-цепочечного углерода (ЛЦУ) на подложке из стекла, отожжённых при

различных температурах. Как видно из рис. 1, спектр 4 плёнки ЛЦУ имеет характерное поглощение в области $350 \div 700$ нм, которое растет при уменьшении длины волны с 700 нм и достигает $\sim 40\%$ при 350 нм. Такое поглощение характерно и для sp^2 , sp^3 -гибридизированных углеродных материалов, например, аморфного алмазоподобного углерода, рис. 2.

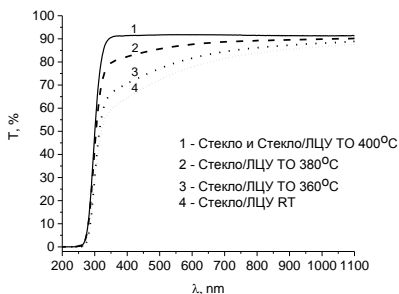


Рис. 1. Оптические спектры пропускания плёнки ЛЦУ подложке из стекла при различных температурах термообработки (ТО и при комнатной температуре (RT))

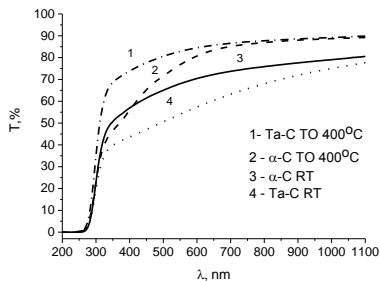


Рис. 2. Оптические спектры пропускания плёнки аморфного углерода (α -C) и алмазоподобного углерода (ta-C) на подложке из стекла при термообработке (ТО) 400°C и комнатной температуре (RT)

Общим для всех исследованных плёнок углерода после нагрева до 400°C является эффект просветления плёнок углерода, связанный с окислением и делокализацией свободных π -электронов, отвечающих за поглощение света. π -электронами sp^2 -фазы объясняется и поглощение в алмазоподобном углероде, поскольку её доля составляет до $30 \div 50\%$, и только остальное sp^3 -фаза. Существенным отличием спектров ЛЦУ (sp -состояние) от остальных является практически полная прозрачность плёнки, достигаемая при температуре отжига 400°C . Полученные результаты могут использоваться как для идентификации разных фаз, так и для создания функциональных оптических покрытий.

Список литературы

1. Коншина Е.А. Аморфный гидрогенизированный углерод и применение его в оптических устройствах. Электронный ресурс: <http://www.iprbookshop.ru/65770.html>.
2. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon // Materials science and engineering. 2002. V. 37. P. 129-281.
3. Паносян Ж.Р. и др. Трёхслойные антиотражающие алмазоподобные углеродные пленки на стекле // ՀՀ ԳԱԱ Տեղեկագիր. Ֆիզիկա. 2015. Т. 50. № 1. С. 96-104.
4. Flood P., Babaev V., Khvostov V., Novikov N., Guseva M. // Polyynes. Synthesis, Properties, and Applications / ed. by F. Cataldo. FL: CRC, Boca Raton, FL. 2005. P. 219-252.

А.К. АЙМУХАНОВ, Г.И. ОМАРБЕКОВА, Д.С. КАМБАР
Карагандинский университет им. акад. Е.А. Букетова, Республика Казахстан

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ СОСТОЯНИЙ НАНОЛЕНТ CoPc И H₂Pc

Представлены результаты исследования рентгено-фазового анализа нанолент CoPc и H₂Pc. Наноленты были получены методом физического градиентно-температурного осаждения. Установлено, что молекулы CoPc находятся в метастабильной α -фазе, а молекулы безметалльного фталоцианина в χ -фазе.

A.K. AIMUKHANOV, G.I. OMARBEKOVA, D.S. KAMBAR
Karaganda University named after academician E.A. Buketov, Kazakhstan

RESEARCH OF THE PHASE STATES OF CoPc AND H₂Pc NANORIBBONS

The paper presents the results of a study of the X-ray phase analysis of CoPc and H₂Pc nanoribbons. The nanoribbons were obtained by physical temperature gradient deposition. It was found that CoPc molecules are in the metastable α -phase, and metal-free phthalocyanine molecules are in the χ -phase.

Наноструктуры были получены методом физического градиентно-температурного осаждения из паровой фазы [1]. Исследование морфологии поверхности полученных образцов проводилось на атомно-силовом микроскопе JSPM-5400 производства компании JEOL. Исследования кристаллической структуры образцов проводились методами рентгеновской дифрактометрии (X-Ray Diffraction, XRD). XRD измерения выполнялись на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7.

Проведён рентгеноструктурный анализ плёнок на основе нанолент, осаждённых на подложках из оптического стекла при оптимальных условиях. На рис. 1 представлены снимки морфологии поверхности и спектры дифракции рентгеновских лучей для фталоцианина и его металлокомплексов. Известно, что фталоцианиновые материалы обычно могут существовать в нескольких кристаллических фазах. Наиболее известны термически метастабильная α -фаза и стабильная β -фаза. Главное отличие между двумя кристаллическими фазами – это угол наклона между нормалью к плоскости молекулы.

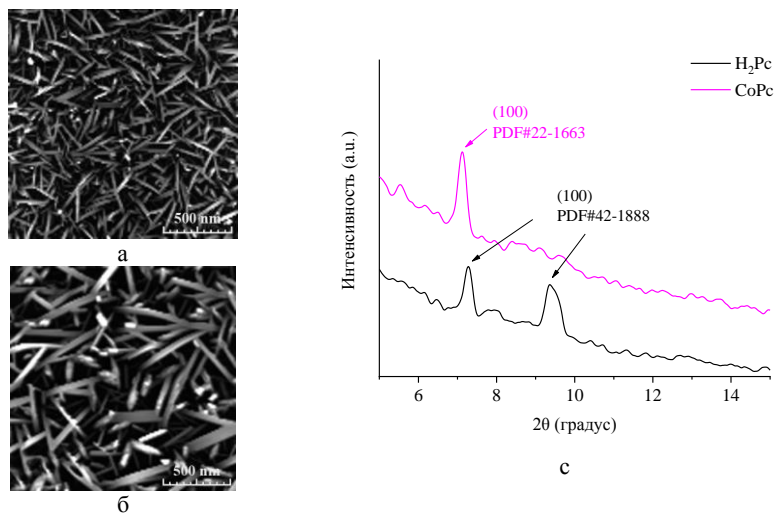


Рис. 1. АСМ снимки и рентгеновские дифрактограммы нанолент фталоцианина: наноленты CoPc (а); наноленты H₂Pc (б); РФА нанолент фталоцианина (в)

Результаты XRD исследования нанолент CoPc, полученных с помощью метода TG-PVD, имеет один дифракционный пик, наблюдаемый при значении угла 2θ , равном $7,09^\circ$. Данный пик находится в плоскости дифракции (100), при параметре элементарной ячейки $d = 12,42 \text{ \AA}$. Это соответствует метастабильной α -фазе молекул CoPc. Наноленты безметалльного фталоцианина (H₂Pc) имеют два дифракционных пика, равных $7,28^\circ$ и $9,41^\circ$ с параметрами решётки $d = 12,14 \text{ \AA}$ и $d = 9,45 \text{ \AA}$ соответственно, наблюдаемыми в плоскостях дифракции (100). Молекулы безметалльного фталоцианина находятся в χ -фазе.

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP08856176).

Список литературы

1. Zhang C., Yan Y., Zhao Y.S., Yao J. Synthesis and applications of organic nanorods, nanowires and nanotubes // Annual Reports on the Progress of Chemistry. Section C. 2013. doi: 10.1039/c3pc90002a.

Д.В. БУЛЬГА¹, С.К. ЕВСТРОПЬЕВ^{1,2,3}, Н.К. КУЗЬМЕНКО¹

¹*Университет ИТМО, Санкт-Петербург*

²*Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург*

³*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)*

ПОЛИМЕРНО-СОЛЕВОЙ СИНТЕЗ НАНОКРИСТАЛЛОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА, ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ

Приведены данные о разработке методики полимерно-солевого синтеза нанокристаллов иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами иттербия. Проведено исследование люминесцентных свойств синтезированного материала.

D. V. BULYGA¹, S. K. EVSTROPIEV^{1,2,3}, N. K. KUZMENKO¹

¹*ITMO University, Saint-Petersburg*

²*S.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg*

³*Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*

POLYMER-SALT SYNTHESIS OF YTTRIUM-ALUMINIUM GARNET NANOCRYSTALS, DOPED WITH YTTERBIUM IONS

Presents the data on the development of a method for the polymer-salt synthesis of ytterbium-doped yttrium aluminum garnet. Luminescent properties of synthesized material were investigated.

Полимерно-солевой метод является одним из наиболее простых и экономичных методов синтеза наноматериалов. Данный метод имеет широкий спектр применений, используется для формирования однородных и прозрачных оксидных покрытий на стеклах [1] и синтеза нанокристаллов, например, оксида иттрия или иттрий-алюминиевого граната (YAG) [2]. Нанокристаллы YAG могут быть введены в оптическое волокно [3], поэтому синтез нанокристаллического YAG, легированного иттербием, представляет интерес для создания волоконных усилителей и лазеров.

Цель работы заключалась в разработке методики полимерно-солевого синтеза нанокристаллического иттрий-алюминиевого граната, легированного иттербием. Для синтеза нанокристаллов был приготовлен водный раствор низкомолекулярного поливинилпирролидона ($M_w = 10000$ г/моль; 4,49 масс. %) и нитратов алюминия (2,01 масс. %),

иттрия (1,56 масс. %) и иттербия (0,02 масс. %). Раствор был высушен при температуре 75 °С, затем полученный композит был подвергнут термообработке при температурах 900, 1000 и 1100 °С в течение двух часов.

Спектры и кривые затухания люминесценции представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Возбуждение люминесценции осуществлялось полупроводниковым лазером с длиной волны 975 нм и длительностью импульса 80 мкс. Кривая затухания люминесценции образца, подвергнутого термообработке при 900 °С сильно отклоняется от экспоненциальной формы, что свидетельствует об образовании не только иттрий-алюминиевого граната, но и других соединений. Кривые затухания других образцов близки к экспоненциальным, отсюда можно сделать вывод, что оптимальная температура синтеза нанокристаллов Yb:YAG – 1000 °С и выше.

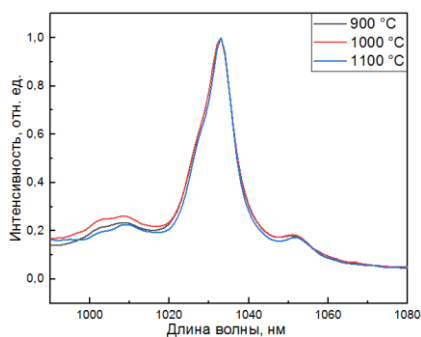


Рис. 1. Спектры люминесценции нанокристаллов Yb:YAG

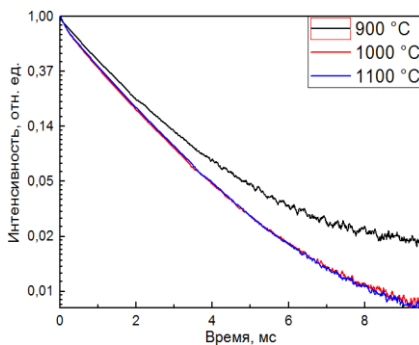


Рис. 2. Кривые затухания люминесценции в логарифмическом масштабе (длина волны излучения 1029 нм)

Работа была частично (Евстропьев С.К., Кузьменко Н.К.) поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований № 20-58-00054.

Список литературы

1. Boltenev I.S., Kolobkova E.V., et al. // J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2018. V. 367. P. 458.
2. Sokolov I.S., Maslennikov S.Y., et al. // Optical Engineering. 2019. V. 58(2). P. 027103.
3. Evstropiev S.K., Aseev V.A., et al. // Quantum Electronics. 2019. V. 49(12). P. 1145.

Д.А. СОКОЛОВА^{1,2}, А.В. КАЦАБА^{1,2}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2,3},
Д.С. ДАЙБАГЕ³, А.В. ОСАДЧЕНКО³, И.А. ЗАХАРЧУК³

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*

КАСКАДНО ВОЗБУЖДАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СОСТОЯНИЯ В НАНОПЛАСТИНАХ CdSe

Приведены результаты экспериментов по исследованию каскадно возбуждаемых электронных состояний в нанопластинах CdSe толщиной в четыре атомных слоя. Обнаружено увеличение интенсивности поглощения нанопластин при одновременном увеличении интенсивности фотолюминесценции.

D.A. SOKOLOVA^{1,2}, A.V. KATSABA^{1,2}, S.A. AMBROZEVICH^{1,2,3},
D.S. DAIBAGYA³, A.V. OSADCHENKO³, I.A. ZAKHARCHUK³

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*

CASCADE EXCITED ELECTRONIC STATES IN CdSe NANOPATELETS

The experimental results on the study of cascade excited electronic states in CdSe nanoplatelets with a thickness of four atomic layers are presented. An increase in the absorption intensity of the nanoplatelets with a simultaneous increase in the photoluminescence intensity was found.

Полупроводниковые наночастицы планарной геометрии представляют исключительный интерес для создания органических светоизлучающих диодов. В таких устройствах планарные наночастицы могут играть роль узкополосных источников света. Тем не менее, развитая поверхность наночастиц способствует появлению безызлучательных каналов релаксации, а также возникновению состояний, ассоциированных с этой поверхностью.

В настоящей работе было экспериментально показано наличие каскадно возбуждаемых ловушек у нанокристаллов CdSe планарной геометрии толщиной в четыре атомных монослоя, пассивированных олеиновой кислотой. Для обнаружения таких ловушек был проведён эксперимент по измерению термостимулированной люминесценции ансамбля нанокристаллов при постоянном лазерном возбуждении в соответствии с методикой, опубликованной ранее [1]. Проявление максимума в поглощении нанокристаллами лазерного возбуждения, а также увеличение интенсивности фотолюминесценции наночастиц при нагреве в области температур больше 200 К свидетельствует о наличии каскадно возбуждаемых ловушек с энергиями порядка 0.5 эВ.

Авторы выражают благодарность П.Н. Тананаеву и А.В. Барышеву, а также Российскому научному фонду, грант №17-72-20088-П.

Список литературы

1. Кацаба А.В., Федянин В.В., Амброзевич С.А. и др. // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49 (10). С. 1367-1370.

Э.А. ГРАНИСО¹, И.Р. НАБИЕВ^{1,2}, В.А. КРИВЕНКОВ¹
¹*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*
²*Университет города Реймса Шампань-Арденн, Франция*

УСИЛЕНИЕ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ КВАНТОВОЙ ТОЧКИ В ПЛЁНКЕ ПММА ВБЛИЗИ СЕРЕБРЯНОЙ НАНОПРИЗМЫ

Используя метод конечных элементов, мы исследовали плазмон-экситонную конфигурацию, в которой квантовая точка (КТ) находится внутри тонкой плёнки полиметилметакрилата, а на поверхности этой плёнки находится серебряная нанопризма. Результаты моделирования показали хорошее совпадение с экспериментом и позволили сделать выводы о конфигурации системы, обеспечивающей максимальное усиление флуоресценции КТ.

E.A. GRANIZO¹, I.R. NABIEV^{1,2}, V.A. KRIVENKOV¹
¹*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*
²*Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France*

FLUORESCENCE ENHANCEMENT OF SINGLE QUANTUM DOT IN PMMA FILM NEAR SILVER NANOPRISM

Using the finite element method, we have investigated the plasmon-exciton configurations, where the quantum dot (QD) is located inside a thin polymethylmethacrylate film, and a silver nanoprism is located on the top of this film. The simulation results show good agreement with the experiment and allow us to make conclusions about the configuration of the system ensuring the maximal QD fluorescence enhancement.

Полупроводниковые квантовые точки (КТ) в полимерных матрицах являются перспективным материалом для создания нового поколения светодиодов, дисплеев и оптоэлектронных устройств. Плазмонные наночастицы (ПНЧ) способны улучшать излучательные свойства близкорасположенных флуорофоров. При этом, усиление фотолюминесценции (ФЛ) очень чувствительно ко многим параметрам, таким как размер, форма, наличие углов у близлежащей ПНЧ, окружающая среда, расстояние между ПНЧ и КТ, и др. [1]. Сферические наночастицы, треугольная нанопризма, наностержень, нанопроволока, структура ядро-оболочка и т. д. доказали свою эффективность в усилении ФЛ КТ [2]. При этом серебро обладает рядом преимуществ перед золотом за счёт отсутствия оптических переходов в видимой области.

Экспериментальные результаты последних лет показали, что форма нанопризмы является одной из самых перспективных для усиления ФЛ КТ [3]. Однако остаётся открытым вопрос о наиболее оптимальных параметрах этой системы, таких как взаимное пространственное расположение КТ и нанопризмы, а также степень спектрального перекрытия между полосой ФЛ КТ, плазмонным спектром нанопризмы, и полосой возбуждающего излучения.

В настоящей работе мы исследовали спектральные свойства КТ и нанопризмы, а также влияние взаимного пространственного расположения КТ и нанопризмы на эффективность усиления ФЛ КТ. Для этого исследования было проведено моделирование взаимодействия КТ и ПНЧ в программной среде COMSOL Multiphysics, используя метод конечных элементов для решения уравнений Максвелла в ближнем поле. Была создана трёхмерная модель для моделирования взаимодействия серебряной нанопризмы с флуоресцентной КТ. На рис. 1 и 2 представлены модель и геометрия модели, использованные ранее в эксперименте [3], при котором КТ находится внутри матрицы ПММА, а серебряная плазмонная нанопризма (ПНП) расположена на поверхности плёнки ПММА, будучи отделённой от КТ на заданное расстояние. Результаты численного моделирования показали хорошее совпадение с ранее полученными экспериментальными результатами и позволили выбрать оптимальные параметры для реализации усиления ФЛ КТ.

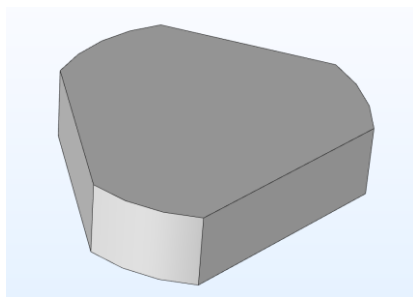


Рис. 1. Модель серебряной плазмонной нанопризмы

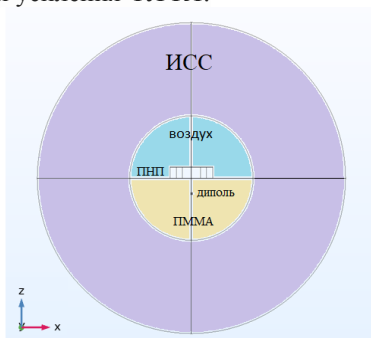


Рис. 2. Геометрия системы, использованная при моделировании

Список литературы

1. Лепешов С. и др. // Успехи физических наук. 2018. Т. 188. № 11. С. 1137-1154.
2. Климов В.В. // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 9. С. 1008-1013.
3. Krivenkov V., et al. // Annalen der Physik. 2020. V. 532. P. 2000236.

А.В. КАЦАБА^{1,2}, Д.А. СОКОЛОВА^{1,2}, С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2,3},
Р.Б. ВАСИЛЬЕВ⁴, Д.С. ДАЙБАГЕ³, А.В. ОСАДЧЕНКО³,
И.А. ЗАХАРЧУК³

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*

⁴*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ФОТОДЕГРАДАЦИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ КОЛЛОИДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК CdS/ZnSe

Приведены результаты исследования механизмов фотостимулированной деградации люминесценции коллоидных квантовых точек CdS/ZnSe. Обнаружено три различных процесса, приводящих к уменьшению интенсивности люминесценции нанокристаллов с характерными временами 9.9 с, 260 с и 2 ч. Показано, что деградация обусловлена возникновением процессов Оже-рекомбинации.

A.V. KATSABA^{1,2}, D.A. SOKOLOVA^{1,2}, S.A. AMBROZEVICH^{1,2,3},
R.B. VASILIEV⁴, D.S. DAIBAGYA³, A.V. OSADCHENKO³,
I.A. ZAKHARCHUK³

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*

⁴*Lomonosov Moscow State University*

LUMINESCENCE PHOTODEGRADATION IN COLLOIDAL CdS/ZnSe QUANTUM DOTS

The mechanisms of photostimulated degradation of luminescence of colloidal CdS/ZnSe quantum dots were studied. Three different processes were found that lead to a decrease in the luminescence intensity of nanocrystals with characteristic times of 9.9 s, 260 s, and 2 h. It was shown that the degradation is associated with Auger recombination processes.

В настоящее время коллоидные полупроводниковые нанокристаллы являются перспективными материалами для создания биосенсоров солнечных элементов, лазеров, фотодетекторов и светодиодов. Интерес к нанокристаллам вызван возможностью контроля их оптических и электронных свойств. Тем не менее, под действием интенсивного оптического возбуждения нанокристаллы оказываются склонными к деградации [1].

В работе были исследованы процессы оптически стимулированной деградации интенсивности люминесценции нанокристаллов CdS/ZnSe. Было обнаружено три процесса деградации, один из которых является частично обратимым. Для установления обнаружения этих процессов был проведён эксперимент, в ходе которого нанокристаллы были помещены в вакуум для устранения влияния атмосферы. В результате было обнаружено, что характерные времена процессов фотодеградации составляют порядка 260 с и 2 ч при 300 К; а характерное время длительной компоненты при 85 К превышает 70 ч.

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду, грант №17-72-20088-П.

Список литературы

1. Rowland C.E., Schaller R.D. // The Journal of Physical Chemistry C. 2013. V. 117 (33). P. 17337.

А.В. ВОЙЦЕХОВСКИЙ¹, С.Н. НЕСМЕЛОВ¹, С.М. ДЗЯДУХ¹,
Д.И. ГОРН¹, С.А. ДВОРЕЦКИЙ^{1,2}, Н.Н. МИХАЙЛОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск

АДМИТТАНС МДП-ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ ТЕЛЛУРИДА КАДМИЯ РТУТИ С ОДИНОЧНЫМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ ТЕЛЛУРИДА РТУТИ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

В широком диапазоне частот и температур исследован адмиттанс МДП-приборов на основе HgCdTe с квантовыми ямами HgTe в активной области. Показано, что перезарядка уровней размерного квантования в одиночной квантовой яме $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 нм)/HgTe (5.6 нм)/ $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 нм) приводит к появлению осцилляций ёмкости и проводимости МДП-структуры в режиме сильной инверсии. Установлено, значительное влияние одиночной квантовой ямы $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 нм)/HgTe (6.5 нм)/ $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 нм) на электрофизические характеристики МДП-приборов.

A.V. VOITSEKHOVSKI¹, S.N. NESMELOV¹, S.M. DZYADUKH¹,
D.I. GORN¹, S.A. DVORETSKY^{1,2}, N.N. MIKHAILOV^{1,2}

¹National Research Tomsk State University

²Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk

ADMITTANCE OF MIS DEVICES BASED ON MERCURY CADMIUM TELLURIDE WITH SINGLE QUANTUM WELLS OF MERCURY TELLURIDE IN THE ACTIVE REGION

The admittance of MIS devices based on HgCdTe with HgTe quantum wells in the active region is studied in a wide range of frequencies and temperatures. It is shown that the charge exchange of the size quantization levels in a single quantum well $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 nm)/HgTe (5.6 nm)/ $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 nm) leads to the appearance of oscillations of the capacitance and conductance of the MIS structure, in strong inversion mode. It is established that a single quantum well $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 nm)/HgTe (6.5 nm)/ $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 nm) has a significant effect on the electrophysical characteristics of MIS devices.

В последние несколько лет спектроскопия адмиттанса широко используется для получения информации об электрических свойствах полупроводниковых гетероструктур с низкоразмерными включениями (квантовыми ямами и квантовыми точками), в том числе с использованием

МДП-приборов. Исследования характеристик МДП-приборов на основе HgCdTe с неоднородным распределением состава до сих пор немногочисленны. Известны экспериментальные исследования свойств МДП-структуры на основе материала $n\text{-Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, содержащего сверхрешётку CdTe/HgTe в приповерхностной области эпитаксиальной плёнки [1]. В данном докладе обобщаются результаты работ [2 - 5], в которых исследован адмиттанс МДП-приборов с квантовыми ямами HgTe .

Структуры для исследований выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs (013) с буферными слоями ZnTe и CdTe в Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН. В типичной наноструктуре одиночная квантовая яма HgTe шириной 5.6 - 6.5 нм размещалась между двумя барьерными слоями из $p(n)\text{-Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0.65 - 0.71$) толщиной 30 - 35 нм. В качестве диэлектриков использовались плёнки Al_2O_3 или $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$. Измерения проводились с помощью автоматической установки спектроскопии адмиттанса на базе неоптического криостата Janis и измерителя иммиттанса Agilent E4980A. Показано, что при создании МДП-приборов с $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 нм)/ HgTe (5.6 нм)/ $p\text{-Hg}_{0.35}\text{Cd}_{0.65}\text{Te}$ (35 нм) в активной области наблюдаются осцилляции ёмкости и проводимости МДП-прибора в режиме сильной инверсии [3, 4]. Максимумы ёмкости и проводимости резко выражены в диапазоне температур от 10 до 30 К, при более высоких температурах максимумы становятся более расплывчатыми. Максимумы ёмкости в режиме сильной инверсии наблюдаются в области промежуточных частот. Возникновение максимумов ёмкости и проводимости в режиме сильной инверсии возможно вследствие эффектов вырождения и непараболичности зоны проводимости, из-за которых поверхностный потенциал при сильной инверсии зависит от напряжения смещения. также обсуждается влияние одиночной квантовой ямы $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 нм)/ HgTe (6.5 нм)/ $n\text{-Hg}_{0.29}\text{Cd}_{0.71}\text{Te}$ (30 нм) на электрофизические характеристики МДП-приборов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0721-2020-0038.

Список литературы

1. Goodwin M.W., Kinch M.A., Koestner R.J. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. P. 2685.
2. Dzyadukh S.M., Voitsekhovskii A.V., et al. // Russ. Phys. J. 2013. V. 56. P. 778.
3. Gorn D.I., Voitsekhovskii A.V., et al. // Int. J. Nanotechnol. 2015. V. 3 - 4. P. 164.
4. Izhnin I.I., Nesmelov S.N., et al. // Nanoscale Res. Lett. 2016. V. 11. P. 53.
5. Izhnin I.I., Syvorotka I.I., et al. // Appl. Nanosci. 2020. V. 10. P. 2489.

А.Р. ГАЗИЗОВ^{1,2}, А.В. ХАРИТОНОВ¹, М.Х. САЛАХОВ^{1,2},
С.С. ХАРИНЦЕВ^{1,2}

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

²*Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань*

ПЛАЗМОННОЕ УСИЛЕНИЕ ВЫНУЖДЕННОГО КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЁНКИ

В этой работе проводится моделирование вынужденного комбинационного рассеяния поверхностной плазмон-поляритонной волны на границе раздела тонкой плёнки из нитрида титана (TiN) и воздуха. Показано, что при интенсивности падающего света больше порогового значения длина распространения стоксовой плазмон-поляритонной волны увеличивается.

A.R. GAZIZOV^{1,2}, A.V. KHARITONOV¹, M.K. SALAKHOV^{1,2},
S.S. KHARINTSEV^{1,2}

¹*Kazan Federal University*

²*Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan*

PLASMON-ENHANCED STIMULATED RAMAN SCATTERING ON THE SURFACE OF METALLIC FILM

In this work, we analyze stimulated Raman scattering of a surface plasmon-polariton wave at the interface between a titanium nitride (TiN) thin film and air. It is shown that when the intensity of the incident light is greater than the threshold value, the propagation length of the Stokes plasmon-polariton wave substantially increases.

Нитриды металлов переходной группы проявляют плазмонные металлические свойства в видимом диапазоне и благодаря непостоянной стехиометрии являются активными при комбинационном рассеянии света (КРС) [1, 2]. В тоже время они обладают большими оптическими потерями. Для их преодоления можно использовать вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) в качестве энергетической подкачки плазмонных волн. ВКР в плазмонных наноструктурах может быть использовано в плоских металлинзах для оптического сверхразрешения [3], усилителей, конвертеров частоты [4] и создания новых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью [5].

Целью работы было исследование эффектов вынужденного комбинационного рассеяния плазмон-поляритонной волны на

поверхности активного в КРС нитриде титана и динамики стоксовой волны в нелинейном режиме.

В результате моделирования было получено распределение поля вблизи поверхности плоской металлической плёнки TiN (рис. 1а). На рис. 1б показана зависимость стоксовой интенсивности от длины пробега плазмон-поляритонной волны. Из-за истощения накачки в характере зависимости имеется максимум. На данном расстоянии поглощение начинает доминировать над нелинейной перекачкой энергии.

Исходя из полученной зависимости можно подобрать размеры нанорезонатора для достижения максимальной добротности.

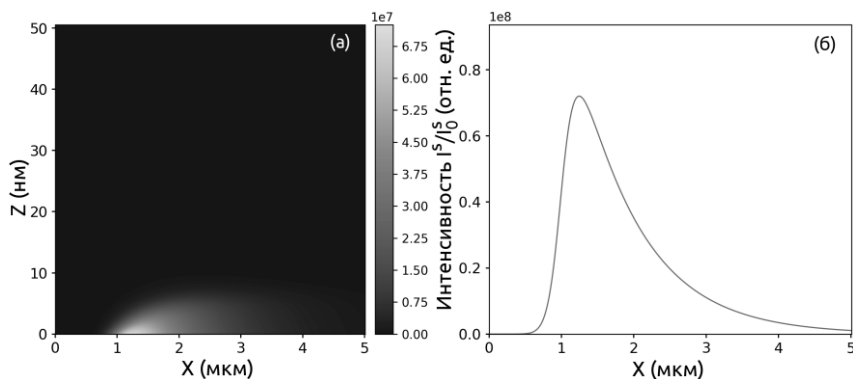


Рис. 1. Распределение интенсивности стоксовой волны в плёнке TiN по длине пробега и глубине (а) и зависимость усиления от длины пробега при $z = 0$ (б), параметры TiN были взяты из [6, 7], длина волны падающего света $\lambda = 632.8$ нм, интенсивность $I_0 = 1$ ГВт/см²

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 19-12-00066).

Список литературы

1. Catellani A., D'Amico P., Calzolari A. // Phys. Rev. Mater. 2020. V. 4. P. 015201.
2. Stoehr M., Shin C.-S., Petrov I., Greene J.E. // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 083503.
3. Kharintsev S.S., Kharitonov A.V., Gazizov A.R., Kazarian S.G. // ACS Appl. Mater. Inter. 2020. V. 12. P. 3862-3872.
4. Prince R.C., Frontiera R.R., Potma E.O. // Chem. Rev. 2017. V. 117. P. 5070-5094.
5. Тюгаев М.Д., Харитонов А.В., Газизов А.Р. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2019. Т. 110 (12). С. 772-776.
6. Sato R., Ishii S., Nagao T., Naito M., Takeda Y. // ACS Photonics. 2018. V. 5. P. 3452-3458.
7. Schnabel V., Spolenak R., Döbeli M., Galinski H. // Adv. Opt. Mater. 2018. V. 6. P. 1800656.

Д.С. ДАЙБАГЕ¹, А.В. ОСАДЧЕНКО¹, И.А. ЗАХАРЧУК¹,
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, Д.А. СОКОЛОВА^{2,4}, М.И. ДАНИЛКИН²

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский политехнический университет

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО ОПУСТОШЕНИЯ ЛОВУШЕК В $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ПРИ НАЛИЧИИ ТРАНСПОРТНОГО БАРЬЕРА ДЛЯ ДЫРОК

Исследована оптически и термически стимулированная люминесценция $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$. Показано что, для дырочных центров захвата, которые работают в $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$, оптическая стимуляция не целесообразна, если только не удастся ещё увеличить энергию квантов высвечивающего света и тем самым улучшить преодоление транспортных барьеров при термализации дырок.

D.S. DAIBAGYA¹, A.V. OSADCHENKO¹, I.A. ZAKHARCHUK¹,
A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, D.A. SOKOLOVA^{2,4}, M.I. DANILKIN²

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

PROBLEMS OF OPTICAL EMPTYING OF TRAPS IN $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ WITH A TRANSPORT BARRIER FOR HOLES

Optically and thermally stimulated luminescence of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ has been investigated. It is shown that, for hole trapping centers in $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$, optical stimulation is not appropriate, unless it is possible to increase the energy of incident photons and thereby improve the overcoming of transport barriers at hole thermalization.

Тетраборат лития ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) используется в термолюминесцентных детекторах радиации, предназначенных для персональной дозиметрии [1], что обусловлено его хорошей тканеэквивалентностью. При введении Mn в $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ образуются дырочные центры захвата на O вблизи Mn, вошедшего в борокислородный каркас, и электронные центры вблизи Mn на месте Li [2].

Чтобы проследить взаимосвязь между кинетикой оптически и термически стимулированной люминесценции (ОСЛ и ТСЛ), исследовались детекторы $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$, ранее рассмотренные в [2, 3]. Образец был облучён высокой дозой рентгеновского излучения (57 кГр, 45 кВ, W-анод). Было измерено диффузное отражение, сначала после облучения, а затем после освещения облучённого образца УФ-светодиодом с $\lambda = 365$ нм. Обнаружено обесцвечивание поглощения светодиода. Спектр излучения УФ-светодиода совпадает с полосой УФ-поглощения, индуцированной в образце рентгеновским излучением.

Обнаружено, что под воздействием светодиода уменьшается высота пика термолюминесценции и смещается его положение. Это свидетельствует об опустошении только части ловушек. Полному опустошению центров захвата светом мешает транспортный барьер для дырок [4], который препятствует переносу дырок к центрам рекомбинации. В результате воздействия светодиода опустошаются только те ловушки, которые расположены недалеко от центров рекомбинации. Если провести моделирование пика ТСЛ [4], то при такой величине транспортного барьера, которая получается из чисто термолюминесцентной модели, оптическое опустошение ловушек вообще невозможно. Тем не менее, часть ловушек всё же опустошается. Это объясняется тем, что энергии квантов УФ-светодиода достаточно для заброса дырок в валентную зону глубже, чем они могут быть заброшены при тепловом освобождении. Тогда при пробеге дырки в процессе термализации она сможет преодолеть хотя бы часть транспортных барьеров. Поэтому наиболее близко расположенные к центрам рекомбинации ловушки всё же опустошаются светом.

Уменьшение площадей под рабочим пиком ТСЛ было рассмотрено как функция времени облучения светодиода. Это уменьшение имело экспоненциальный характер. Полученный результат может быть объяснён в рамках модели, разработанной в [4].

Список литературы

1. Danilkin M.I., Vereschagina N.Y., Selyukov A.S., Ozol D.I. // IFMBE Proc. 2020. V. 77. P. 827-830.
2. Kerikmäe M., Danilkin M., et al. // Radiation Measurements. 2010. V. 45 (3-6). P. 559-561.
3. Ratas A., Danilkin M., et al. // Proc. Est. Acad. Sci. 2012. V. 65 (4). P. 279-295.
4. Селюков А.С., Применко А.Э., Гарденина Т.А., Данилкин М.И. // КСФ. 2020. Т. 47 (11). С. 37-45.

А.В. ОСАДЧЕНКО¹, Д.С. ДАЙБАГЕ¹, И.А. ЗАХАРЧУК¹,
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, Д.А. СОКОЛОВА^{2,4}, М.И. ДАНИЛКИН²

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский политехнический университет

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

РАДИАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ И $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты исследования деградации оптических и структурных свойств образцов $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$. Обнаружено, что $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ имеет слишком высокую температуру высвечивания и очень низкую радиационную стойкость, поэтому для практического использования он малопригоден. С другой стороны, образец $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ имеет умеренную радиационную деградацию, удобный, не слишком высокотемпературный пик ТСЛ и может быть рекомендован к практическому применению для персональной дозиметрии.

A.V. OSADCHENKO¹, D.S. DAIBAGYA¹, I.A. ZACHARCHUK¹,
A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, D.A. SOKOLOVA^{2,4}, M.I. DANILKIN²

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

RADIATION DAMAGE OF $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ AND $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ UNDER COMBINED EXPOSURE TO ELECTRON BEAM AND LASER RADIATION

The results of a study of the degradation of the optical and structural properties of the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ and $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ samples are presented. It was found that $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Be}+\text{Mn}$ has a too high afterglow temperature and very low radiation resistance, therefore, it can hardly be of practical use. On the other hand, the $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ sample has moderate radiation degradation, a convenient, not too high-temperature TSL peak, and can be recommended for practical use for personal dosimetry.

Тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ широко известен как тканеэквивалентный материал, применяемый в термолюминесцентных детекторах радиации. В последнее время высокий интерес вызывает считывание таких детекторов, легированных различными примесями (Mn [1], Ag [2], Cu [3]), при помощи оптической стимуляции вместо термической. При этом ключевую роль играет информация о том, какие примеси приводят к снижению устойчивости материала и возникновению дозиметрических ошибок.

В работе проведено исследование деградации свойств термолюминесцентных материалов $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ve}+\text{Mn}$ и $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Zn}+\text{Mn}$ при комбинированном воздействии импульсного электронного пучка и лазерного излучения с длиной волны 350 нм.

Обнаружено, что оба пика ТСЛ (низкотемпературный и рабочий) связаны с красно-оранжевой люминесценцией Mn в кристаллическом поле с симметрией, близкой к октаэдрической. Согласно результатам работы [1] Mn не перезаряжается при запасании энергии и ТСЛ. Вместо этого носители заряда захватываются на химические связи Mn с окружением. Связи «напрягаются» и становятся неустойчивыми. Остаточная ТСЛ после выжигания дозы связана с освобождением дырки с кислородных мостиков, которые возникают в результате разрушения радиацией основной структуры [4]. Чем больше доза радиации, тем сильнее разрушение структуры, больше количество кислородных мостиков и интенсивнее остаточная термолюминесценция [4]. Побочным результатом образования кислородных мостиков является радиационная кластеризация Mn. Процессы кластеризации Mn и формирования кислородных мостиков взаимно усиливают друг друга [4].

Лазерное воздействие способно усугубить радиационное разрушение материала, приводя к формированию у Mn другого кислородного окружения, а именно тетраэдрического, в котором Mn светит уже не красно-оранжевым, а зелёным. Лазерное воздействие очень сильно выражено для образцов, которые уже получили большую дозу радиации и уже неоднократно подвергались процедуре облучения и высвечивания.

Список литературы

1. Danilkin M., Jaek I., et al. // Radiation Measurements. 2010. V. 45 (3-6). P. 562-565.
2. Romet I., Aleksanyan E., et al. // Journal of Luminescence. 2016. V. 177. P. 9-16.
3. Brant A.T., Buchanan D.A., et al. // Journal of Luminescence. 2013. V. 139. P. 125-131.
4. Danilkin M.I., Koksharov Yu.A., et al. // Radiation Measurements. 2019. V. 126. P. 106134.

О.В. ДЕВИЦКИЙ^{1,2}, И.А. СЫСОЕВ²

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь

²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН,
Ростов-на-Дону

ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InGaAsP/Si

Методом импульсного лазерного напыления получены гетероструктуры InGaAsP/Si. По результатам энергодисперсионного анализа установлено, что стехиометрический состав полученной гетероструктуры совпадает с составом изготовленной мишени.

O. V. DEVITSKY^{1,2}, I. A. SYSOEV²

¹North Caucasian Federal University, Stavropol

²Federal Research Center Southern Scientific Center of the RAS, Rostov-on-Don

PULSE LASER DEPOSITION OF InGaAsP/Si HETEROSTRUCTURES

InGaAsP / Si heterostructures are obtained by the method of pulsed laser deposition. According to the results of energy dispersive analysis, it was found that the stoichiometric composition of the obtained heterostructure coincides with the composition of the manufactured target.

Получение четырёх- и пятикомпонентных тонких плёнок и гетероструктур соединений A^3B^5 является достаточно актуальной задачей для современной оптоэлектроники. Основными методами для получения данных гетероструктур являются молекулярно-лучевая эпитаксия, жидкофазная эпитаксия, метод осаждение металлорганических соединений из газовой фазы. Для всех перечисленных методов характерны достаточно высокие температуры при получении многокомпонентных гетероструктур соединений A^3B^5 (более 500 – 600 °C). Однако следует учитывать, что большинство многокомпонентных твёрдых растворов на основе соединений A^3B^5 в жидкой фазе при температурах более 500 °C являются неустойчивыми в широких диапазонах составов и могут распадаются на периодические структуры с чередующимся составом.

Перспективным методом получения многокомпонентных гетероструктур соединений A^3B^5 является метод импульсного лазерного

напыления (ИЛН). Сущность ИЛН заключается в распылении поликристаллической мишени определённого состава лазерными импульсами и последующем осаждении её распылённых частиц на подложке. Целью работы является получение гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{Si}$ и исследование их стехиометрии.

Процесс ИЛН осуществлялся распылением мишени $\text{In}_{0,48}\text{Ga}_{0,52}\text{As}_{0,66}\text{P}_{0,34}$ в атмосфере аргона, при помощи второй гармоники АУГ: Nd^{3+} -лазера (LOTIS ТП LS – 2134У). Длительность импульса составляла 10 нс, частота повторения импульсов – 15 Гц. Расстояние от поверхности мишени до подложки составляло 40 мм, температура подложки составляла 350 °С. Плотность энергии лазерного импульса составляла от 20 Дж/см². Мишень формировалась методом холодного изостатического прессования из шихты, полученной смешением порошков GaP, GaAs и InAs. В качестве подложек использовался монокристаллический кремний с ориентацией (100).

Результаты энергодисперсионного микроанализа, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что состав гетероструктуры $\text{In}_{0,48}\text{Ga}_{0,52}\text{As}_{0,66}\text{P}_{0,34}/\text{Si}$ соответствует исходному составу мишени.

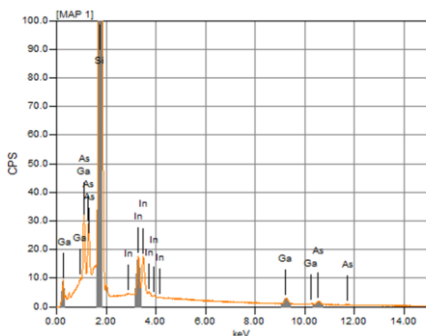


Рис. 1. Результаты энергодисперсионного анализа гетероструктуры $\text{In}_{0,48}\text{Ga}_{0,52}\text{As}_{0,66}\text{P}_{0,34}/\text{Si}$

Работа выполнена в рамках ГЗ «Разработка и создание полупроводниковых гетероинтерфейсов на основе многокомпонентных материалов для устройств СВЧ-электроники и фотоники» номер гос. регистрации АААА-А19-119040390081-2.

Список литературы

1. Lunin L.S., Lunina M.L., et al. // Semiconductors. 2017. V. 51. No. 3. P. 387-391.

И.А. ЗАХАРЧУК¹, А.В. ОСАДЧЕНКО¹, Д.С. ДАЙБАГЕ¹,
А.С. СЕЛЮКОВ^{1,2,3}, Д.А. СОКОЛОВА^{2,4}, М.И. ДАНИЛКИН²,
С.П. ЕЛИСЕЕВ^{2,4}, В.П. ГРАФОВА⁵, С.О. КЛИМОНСКИЙ⁵,
Р.Б. ВАСИЛЬЕВ⁵

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

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*

³*Московский политехнический университет*

⁴*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный*

⁵*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИКИ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НАНОПЛАСТИН И НАНОСВИТКОВ CdSe В ФОТОННОМ КРИСТАЛЛЕ

В работе исследованы кривые затухания люминесценции для нанокристаллов CdSe планарной геометрии и наносвитков CdSe, помещённых в матрицу инвертированного фотонного кристалла. Обнаружена зависимость кинетики люминесценции от диаметра пор фотонного кристалла и, соответственно, положения стоп-зоны.

I.A. ZACHARCHUK¹, A.V. OSADCHENKO¹, D.S. DAIBAGYA¹,
A.S. SELYUKOV^{1,2,3}, D.A. SOKOLOVA^{2,4}, M.I. DANILKIN²,
S.P. ELISEEV^{2,4}, V.P. GRAFOVA⁵, S.O. KLIMONSKY⁵,
R.B. VASILIEV⁵

¹*Bauman Moscow State Technical University*

²*Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow*

³*Moscow Polytechnic University*

⁴*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny*

⁵*Lomonosov Moscow State University*

VARIATIONS IN THE PHOTOLUMINESCENCE DECAYS FOR CdSe NANOPATELETS AND NANOSCROLLS IN A PHOTONIC CRYSTAL

Luminescence decay curves for planar CdSe nanocrystals and CdSe nanoscrolls placed in the matrix of an inverted photonic crystal are studied. The dependence of the luminescence kinetics on the pore diameter of the photonic crystal and, accordingly, on the position of the stop band is found.

На сегодняшний день существует достаточно большое разнообразие полупроводниковых наночастиц различной морфологии. Недавно были синтезированы свёрнутые в виде трубок наноструктуры (наносвитки), которые были получены на основе плоских полупроводниковых нанопластин [1, 2]. Это открывает новые возможности в области оптических нанотехнологий.

В работе исследованы образцы полимерных плёнок со структурой инвертированного опала с наночастицами CdSe, для которых положение стоп-зоны согласуется с максимумом спектра фотolumинесценции наноструктур CdSe, либо смещено в область больших длин волн.

Спектры пропускания матриц 1 и 2, обработанных раствором наночастиц CdSe в толуоле, свидетельствуют о вхождении наноструктур внутрь образца, поскольку в этих спектрах наблюдаются характерные изменения в областях, соответствующих экситонному поглощению наночастиц CdSe. У образца 1 обнаружено существенное изменение вида спектральной зависимости фотонной стоп-зоны, поскольку для данного кристалла положение стоп-зоны накладывается на поглощение наночастиц CdSe. Для образца 2 с наноструктурами CdSe вид стоп-зоны по сравнению с необработанной матрицей не изменяется.

На малых временах (0 – 5 нс) обнаружено замедление релаксации люминесценции для образца 1 с наноструктурами CdSe, для которого положение стоп-зоны совпадает с максимумом экситонной люминесценции наночастиц CdSe, по сравнению с затуханием люминесценции этих нанокристаллов на стекле. Полученный результат объясняется тем, что внутри матрицы фотонного кристалла частицы сориентированы в направлении нормали к поверхности под действием электрического поля, возникающего при освещении поверхности фотонного кристалла. Действующие в определённых кристаллографических направлениях стоп-зоны приводят к уменьшению вероятности взаимодействия между соседними наночастицами, из-за чего кривая затухания для образца 1 оказывается наиболее близка к естественной кривой затухания, в то время как для других образцов происходит концентрационное тушение, приводящее к ускорению на участке 0 – 5 нс кривой и замедлению на больших временах. В случае образца 2 стоп-зона не оказывает существенного действия, так как частицы не являются надёжно изолированными друг от друга.

Список литературы

1. Kurtina D.A., Garshev A.V., et al. // Chemistry of Materials. 2019. V. 31 (23). P. 9652-9663.
2. Vasiliev R.B., Sokolikova M.S., et al. // Quantum Electronics. 2015. V. 45 (9). P. 853-857.

Д.А. КОРДЕЙРО МАГРИНЬО¹, В.М. КОРШУНОВ^{1,2},
С.А. АМБРОЗЕВИЧ^{1,2,3}, И.В. ТАЙДАКОВ²

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

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

³Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет), Долгопрудный

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЙ ПЕРЕНОСА ЗАРЯДА С ЛИГАНДА НА МЕТАЛЛ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕНСИБИЛИЗАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ИОНА ЕВРОПИЯ (III) В КООРДИНАЦИОННЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ИОНА ЕВРОПИЯ (III)

Для координационных соединений ион европия с лигандным окружением из класса 1,3-дикетонов была установлена модель переноса энергии электронного возбуждения с лиганда на центральный ион. Показано, что в зависимости от длины фторированной углеродной цепи в качестве одного из каналов переноса энергии могут выступать состояния переноса заряда с лиганда на металл.

D.A. KORDEYRO MAGRINO¹, V.M. KORSHUNOV^{1,2},
S.A. AMBROZEVITCH^{1,2,3}, I.V. TAIDAKOV²

¹Bauman Moscow State Technical University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

³Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny

INFLUENCE OF CHARGE TRANSFER STATES FROM LIGAND TO METAL ON THE EFFICIENCY OF LUMINESCENCE SENSITIZATION OF EUROPIUM ION (III) IN THE COORDINATION COMPOUNDS OF EUROPIUM ION (III)

A model for the transfer of electron excitation energy from the ligand to the central ion was established for the coordination compounds of the europium ion with ligand environment from the 1.3-decketon class. It was shown that depending on the length of the fluorinated carbon chain, charge transfer states from ligand to metal may act as one of the energy transfer channels.

В настоящее время существует потребность в новых высокоэффективных светоизлучающих материалах, которые могут быть успешно применены в ряде практических задач [1]. Одним из

перспективных классов люминофоров являются координационные соединения трёхвалентных ионов лантаноидов с органическими лигандами на основе 1,3-дикетонов. В координационных соединениях ионов лантаноидов органическое лигандное окружение выступает в качестве так называемой “антенны”, которая поглощает энергию падающего излучения и передаёт её непосредственно на ион лантаноида. Если энергетическая разница между низшим триплетным состоянием лиганда и резонансным уровнем иона Tb³⁺ или Eu³⁺ относительно мала, то вероятность обратного теплового переноса энергии между этими уровнями значительно увеличивается, что приводит к тушению люминесценции всего соединения. В представленной работе была исследована зависимость вероятности обратного теплового переноса от длины фторированной углеродной цепи лигандного окружения. Для этого были синтезированы новые координационные соединения Eu(III) с аналогами теноилтрифторацетона (Htta), у которого варьировалась длина боковой перфторированной цепи от одного до восьми атомов углерода. Были измерены кинетики фотолюминесценции исследованных комплексов при комнатной температуре и при различных температурах от 100 до 300 К. Анализ полученных данных проводился с помощью уравнения Аррениуса. Установлено, удлинение фторированной углеродной цепи лигандного окружения позволило сократить энергетические потери при переносе энергии на центральный ион вместе с увеличением квантового выхода люминесценции с 18 до 70 %.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-02-00222).

Список литературы

1. Vaithyanathan M., et al. Luminescent nanomaterials for droplet tracking in a microfluidic trapping array // Analytical and bioanalytical chemistry. 2019. Т. 411. №. 1. С. 157-170.

Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, Н.В. РУДАКОВА^{1,2}, С.Я. ВЕТРОВ^{2,1},
И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2}

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

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДИЗАЦИИ ТАММОВСКИХ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНОВ С МОДАМИ ДВУМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ СРЕД

В работе исследованы спектральные свойства гибридных мод, образованных в результате связи таммовского плазмон-поляритона с модами двумерных диэлектрических наноструктурированных сред.

R.G. BIKBAEV^{1,2}, N.V. RUDAKOVA^{1,2}, S.Ya. VETROV^{2,1},
I.V. TIMOFEEV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*

¹*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

INVESTIGATION OF THE HYBRIDIZATION OF TAMM PLASMON-POLARITONS AND MODES OF TWO-DIMENSIONAL NANOSTRUCTURED MEDIA

Spectral properties of hybrid modes excited by coupling the Tamm plasmon-polariton and modes of two-dimensional dielectric nanostructured media are investigated.

Особым типом поверхностных электромагнитных состояний является оптическое таммовское состояние, при котором поле экспоненциально затухает по обе стороны от границы раздела, и может прекращаться перенос энергии вдоль поверхности [1]. Оптическое таммовское состояние может возбуждаться между двумя различными фотонными кристаллами (ФК), имеющими перекрывающиеся запрещённые зоны или между фотонным кристаллом и средой с отрицательной диэлектрической проницаемостью, например, металлом или наноккомпозитом (НК) [2, 3]. В последнем случае его также называют таммовским плазмон-поляритоном (ТПП), поскольку поле излучения связывается с поверхностным плазмонным возбуждением.

Взаимодействие ТПП с другими типами локализованных мод (микрорезонаторная мода, поверхностный или локализованный плазмон-

поляритон, экситон) позволяет создать устройства принципиально нового класса [4, 5]. Однако, в литературе практически отсутствуют теоретические и экспериментальные работы, посвящённые исследованию гибридных мод, образованных в результате связи таммовского плазмон-поляритона и решёточных мод двумерного периодического массива диэлектрических или плазмонных частиц [6].

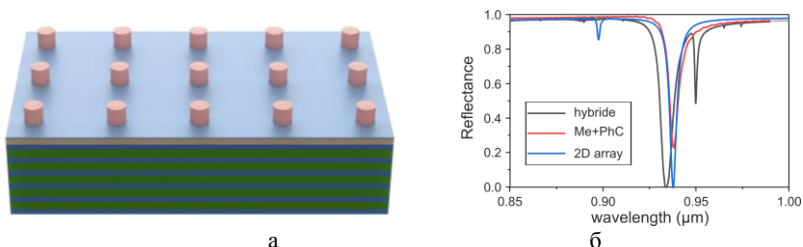


Рис. 1. Схематичное изображение исследуемой структуры (а) и спектры отражения исследуемой структуры (б)

Исследуемая нами структура представляет собой ФК, сопряжённый с тонкой металлической плёнкой (рис. 1). На поверхность металлической плёнки нанесён буферный слой, на котором в последствии формируется двумерная решётка из диэлектрических наноцилиндров с высотой 200 нм и радиусом 80 нм. Спектры пропускания и отражения исследуемой структуры были рассчитаны методом конечных разностей во временной области. Результаты расчёта представлены на рис. 1, из которого видно, что сопряжение длины волны ТПП и моды двумерной решётки приводит к формированию гибридной моды. Спектрально эффект гибридизации проявляется в виде расщепления линии и формирования двух минимумов отражения на длинах волн $\lambda = 933$ нм и $\lambda = 950$ нм.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (заявка МК-46.2021.1.2) и при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-42-240005.

Список литературы

1. Виноградов А.П. и др. // УФН. 2010. Т. 180. С. 249-263.
2. Kaliteevski M. et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
3. Vetrov S.Ya., Bikbaev R.G., Timofeev I.V. // JETP. 2013. V. 117. P. 988.
4. Symonds C., et al. // Nano. Lett. 2013. V. 13. P. 3179.
5. Gazzano O., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 232111.
6. Khlopin D., et al. // Journal of the Optical Society of America B. 2017. V. 34. P. 691.

Н.Ю. КРУЧИНИН, М.Г. КУЧЕРЕНКО, А.П. РУСИНОВ,
В.М. НАЛБАНДЯН

Оренбургский государственный университет

КОНФОРМАЦИОННАЯ ПЕРЕСТРОЙКА ПОЛИМЕРНОГО ОКРУЖЕНИЯ ПЛАЗМОННОЙ НАНОЧАСТИЦЫ В СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Методом молекулярной динамики исследованы конформационные изменения адсорбированных на поверхности золотой наночастицы полиамфолитных полипептидов в СВЧ-поле. Экспериментально показано, что в присутствии биомолекул оптические спектры поглощения растворов наночастиц изменяются, а действие СВЧ-поля усиливает эти изменения.

N.Yu. KRUCHININ, M.G. KUCHERENKO, A.P. RUSINOV,
V.M. NALBANDYAN

Orenburg State University

CONFORMATIONAL REARRANGEMENTS OF POLYMER ENVIRONMENT OF PLASMON NANOPARTICLE IN MICROWAVE ELECTRIC FIELD

The conformational changes of polyampholyte polypeptides adsorbed on the surface of a gold nanoparticle in a microwave field have been studied by the molecular dynamics method. It has been shown experimentally that in the presence of biomolecules, the optical absorption spectra of nanoparticle solutions change, and the action of the microwave field amplifies these changes.

Проведено молекулярно-динамическое (МД) моделирование полиамфолитных полипептидов с разными законами распределения заряженных звеньев в макроцепи на поверхности золотой наночастицы (НЧ) с периодическим изменением поляризации наночастицы с частотой, соответствующей СВЧ-полю. Рассчитаны временные зависимости изменений дипольных моментов, радиальные распределения плотности атомов и угловые распределения атомов адсорбированных полипептидов. При периодическом изменении направления поляризации НЧ (рис. 1а) наблюдались как колебания конформационной структуры адсорбированного полиамфолитного полипептида (рис. 1б), так и образование макромолекулярного кольца в экваториальной области наночастицы (рис. 1в) [1].

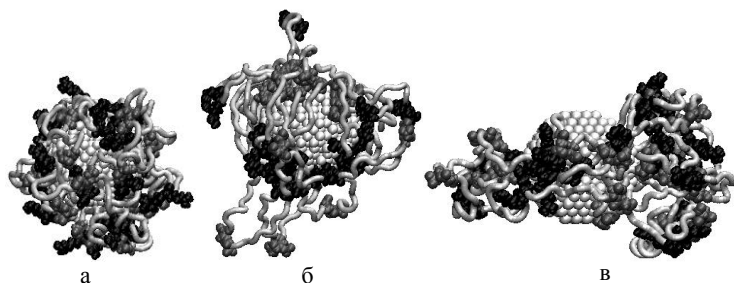


Рис. 1. Конформации полипептида $(A_4R_2A_8D_2A_4)_{20}$ при МД-моделировании с периодическим изменением поляризации НЧ: стартовая конформация (а); при вертикальной ориентации дипольного момента НЧ при температуре 900 К (б); по окончании МД-моделирования при температуре 300 К (в), светло-серая трубка – звенья Ala, чёрным цветом изображены звенья Arg, а серым – Asp

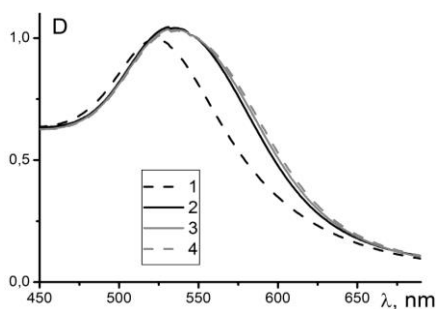


Рис. 2. Спектр поглощения водного раствора НЧ золота полученного цитратным методом без лизоцима (1), с лизоцимом (2) и при его экспозиции СВЧ-полем 2 (3) и 8 (4) минут

синтезированных боргидридным методом, изменения в спектрах поглощения отсутствуют. При воздействии на исследуемый раствор СВЧ-поля от генератора PLG06-11F наблюдается дополнительный сдвиг полосы поглощения системы «биополимер-наночастица» в область больших длин волн (рис. 2, кривые 3 и 4), что может быть связано с конформационной перестройкой молекулярного окружения наночастиц.

Из спектров поглощения (рис. 2, кривые 1 и 2) следует, что эффективность взаимодействия полимера и НЧ существенно зависит от соотношения их знаков заряда. Так молекулы лизоцима, имеющие в водном растворе положительный (+7e) заряд взаимодействуют с наночастицами противоположного знака, стабилизированными цитрат-ионами[2], что проявляется в усилении полосы плазмонного поглощения и её сдвигу в длинноволновую область на 15 - 20 нм. Для наночастиц,

Список литературы

1. Кручинин Н.Ю., Кучеренко М.Г. // Коллоидный журнал, 2020. Т. 82. № 4. С. 440-540.
2. Li Z.P., Duan X.R., Liu C.H., Du B.N. // Anal. Biochem. 2006. V. 351. P. 18-25.

Е.А. ДЕМИШКЕВИЧ, А.Ю. ЗЮБИН, А.А. ХАНКАЕВ,
Д.А. АРТАМОНОВ, И.Г. САМУСЕВ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ФОРМИРОВАНИЕ МОНОДИСПЕРСНЫХ ПЛАТИНОВЫХ НАНОЧАСТИЦ МЕТОДОМ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

В работе приведены результаты синтеза наночастиц платины с помощью фемтосекундной лазерной абляции. Была разработана методика синтеза и получены наночастицы платины с малым распределением по размерам. Представлены зависимости спектров поглощения, а также распределения размеров полученных наночастиц платины от мощности излучения.

E.A. DEMISHKEVICH, A. Yu. ZYUIBN, A.A. KHANKAEV,
D.A. ARTAMONOV, I.G. SAMUSEV

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

SYNTHESIS OF MONODISPERSE PLATINUM NANOPARTICLES BY FEMTOSECOND LASER ABLATION

The results of the synthesis of platinum nanoparticles by femtosecond laser ablation have been performed. The methodology of the nanoparticle synthesis has been developed. The nanoparticles with a small size distribution have been obtained. Dependence of the absorption spectrum and the size distribution on the laser power has been performed.

Усиление фотопроцессов вблизи наноструктур различной морфологии, при размерах, значительно меньших их длины волны, используется во многих научных исследованиях [1]. В настоящее время существует необходимость исследования широкого круга биологических соединений, таких как нуклеотидные основания, нуклеиновые кислоты и ароматические аминокислоты в клетках, которые имеют полосы поглощения в УФ-диапазоне [2, 3]. Аминокислоты обладают собственной флуоресценцией, которая может быть использована для их анализа. В связи с этим, создание средств усиления фотопроцессов в УФ-диапазоне является актуальной задачей. Для решения данной задачи используют несколько металлов, активных в УФ-диапазоне, в том числе платину, которая обладает также высокой степенью химической инертности.

Целью настоящей работы является отработка методики фемтосекундного лазерного синтеза наночастиц (НЧ) платины для

получения монодисперсных распределений размеров НЧ и выраженного спектра поглощения в УФ-диапазоне.

Для синтеза НЧ использовался фемтосекундный лазер ТЕТА-Х (Авеста, Россия). В кювету с 1,5 мл воды погружался металл и проводилась абляция в течение 2 и 7 минут в нескольких режимах с разными значениями тока от 4 до 5.2 А с шагом 0.3 А. В результате синтеза был ряд образцов коллоидных наночастиц (рис. 1), каждый из которых был исследован с помощью спектрофотометрии и фотон-корреляционной спектроскопии. В результате анализа оптических и морфологических характеристик был определён режим абляции, при котором для наночастиц наблюдался выраженный пик плазмонного резонанса при длине волны максимума, близкой к $\lambda = 260$ нм (рис. 2), а также был определён режим для получения НЧ с высокой степенью монодисперсности. В рамках работы также был анализирован размер синтезированных частиц в зависимости от режима абляции.

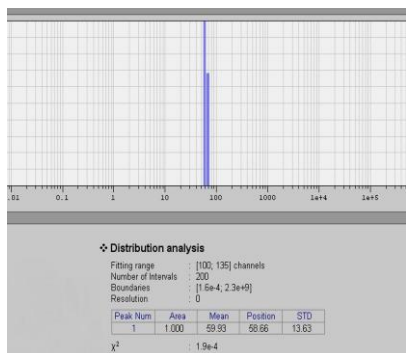


Рис. 1. Распределение размеров НЧ платины

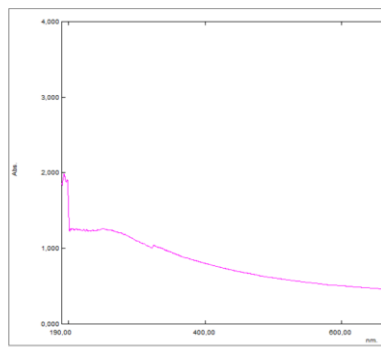


Рис. 2. Спектр поглощения НЧ платины

Работа выполнена при поддержке проекта государственного задания Минобрнауки РФ № FZWM-2020-0003 «Исследование новых материалов и методов плазмо- и фототерапии онкологических заболеваний, дерматитов и септических осложнений» 2020-2023 гг.

Список литературы

- Langer J., et al. Present and future of surface-enhanced Raman scattering // ACS nano. 2019. V. 14. № 1. P. 28-117.
- Voet D., Gratzner W.B., Cox R.A., Doty P. Absorption spectra of nucleotides, polynucleotides, and nucleic acids in the far ultraviolet // Biopolymers. 1963. V. 1, P. 193-208.
- Kumamoto Y., Taguchi A., Smith N.L., Kawata S. Deep UV resonant Raman spectroscopy for photodamage characterization in cells // Biomed. Opt. Express. 2011. V. 2. P. 927.

Т.М. ЧМЕРЕВА, М.Г. КУЧЕРЕНКО, Ф.Ю. МУШИН
Оренбургский государственный университет

НЕЛИНЕЙНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА ОТ МОНОСЛОЯ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ

Проведено теоретическое исследование отражения света на удвоенной частоте от монослоя сферических плазмонных наночастиц, расположенного вблизи границы раздела двух оптически прозрачных сред. Рассчитана нелинейная поляризация границы раздела, являющаяся источником второй гармоники. Обнаружено увеличение интенсивности отражённой волны, вызванное дипольным и квадрупольным плазмонными резонансами в наночастицах.

T.M. CHMEREVA, M.G. KUCHERENKO, F.Yu. MUSHIN
Orenburg State University

NONLINEAR REFLECTION OF LIGHT FROM A MONOLAYER OF PLASMON NANOPARTICLES

A theoretical study of light reflection at a doubled frequency from a monolayer of spherical plasmon nanoparticles located near the interface between two optically transparent media has been carried out. The nonlinear polarization of the interface, which is the source of the second harmonic, is calculated. An increase in the intensity of the reflected wave, caused by dipole and quadrupole plasmon resonances in the nanoparticles, is found.

Композитные системы, имеющие в своем составе плазмонные наночастицы, привлекают внимание исследователей в связи с возможностью использования их уникальных оптических свойств при создании сенсоров, нанолазеров, оптических наноантенн, органических солнечных элементов и других оптоэлектронных устройств.

В данной работе проведено теоретическое исследование генерации второй гармоники неупорядоченным монослоем сферических плазмонных наночастиц, расположенным вблизи плоской границы раздела двух диэлектриков. При падении плоской волны на поверхность раздела наночастицы оказываются в поле преломленной волны. В этом поле они приобретают дипольный и квадрупольный моменты, осциллирующие с удвоенной частотой. Нелинейная поляризация приграничного слоя, возникающая за счёт индукции дипольного и квадрупольного моментов в

наночастицах и служащая источником волн удвоенной частоты, может быть представлена в виде [1]

$$P_{si}^{2\omega} = \chi_{ijkl}^d E_j \nabla_k E_l - \chi_{ijkl}^q \nabla_j E_k E_l.$$

Компоненты тензоров нелинейной поверхностной восприимчивости χ_{ijkl}^d , χ_{ijkl}^q получаются в результате преобразования тензоров дипольной и квадрупольной поляризуемостей наночастицы при переходе из системы координат $x'y'z'$, связанной с наночастицей, в лабораторную систему [2].

Поляризуемость, определяющая нелинейный дипольный момент наночастицы, равна

$$\alpha_{y'z'y'z'} = 4\pi R^2 (\varepsilon_m(2\omega) D_1(\omega) + RC_1(\omega)) / (\varepsilon_m(2\omega) + 2\varepsilon_2),$$

элементы тензора квадрупольной поляризуемости даются выражениями

$$\alpha_{x'x'z'z'} = \alpha_{y'y'z'z'} = -\frac{1}{2} \alpha_{z'z'z'z'} = -\frac{8\pi R^3 (2\varepsilon_m(2\omega) D_0(\omega) + RC_0(\omega))}{3(2\varepsilon_m(2\omega) + 3\varepsilon_2)},$$

где ε_2 – диэлектрическая проницаемость среды, окружающей частицу, R – радиус наночастицы, $\varepsilon_m(2\omega)$ – диэлектрическая проницаемость благородного металла. Коэффициенты $C_0(\omega)$ и $C_1(\omega)$ определяют

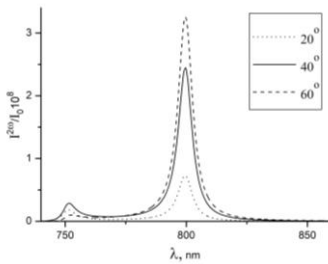


Рис. 1. Спектральная зависимость относительной интенсивности отражённой второй гармоники при различных углах падения

нелинейную поверхностную плотность заряда наночастицы, $D_0(\omega)$ и $D_1(\omega)$ – нормальную составляющую вектора нелинейной поверхностной поляризации наночастицы. Результаты расчётов интенсивности отражённой волны удвоенной частоты, выполненные для серебряных наночастиц радиуса 5 нм, представлены на рис. 1. Напряжённость поля в падающей волне составляла $3 \cdot 10^6$ В/см. Правый пик соответствует дипольному плазмонному резонансу в наночастицах на удвоенной частоте, левый – квадрупольному.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSGU-2020-0003.

Список литературы

1. Guyot-Sionnest P., Shen Y.R. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. P. 7985.
2. Jerome B., Shen Y.R. // Phys. Rev. E. 1993. V. 48. P. 4556.

А.В. ИЛЬИНСКИЙ, Р.А. КАСТРО¹, М.Э. ПАШКЕВИЧ²,
И.О. ПОПОВА¹, Е.Б. ШАДРИН

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
¹Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена
²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ ИЗОЛЯТОР-МЕТАЛЛ В ПЛЁНКАХ VO₂

В работе обнаружена и интерпретирована немонотонность температурного хода коэффициентов преломления и экстинкции нелегированных плёнок VO₂.

A.V. ILYINSKY, R.A. CASTRO¹, M.E. PASHKEVICH²,
I.O. POPOVA¹, E.B. SHADRIN

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS, Saint-Petersburg
¹The Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint-Petersburg
²Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

ELLIPSOMETRY OF HYSTERESIS PHENOMENA BY INSULATOR-METAL PHASE TRANSITION IN VO₂ FILMS

The nonmonotonicity of temperature dependence of the refractive index and extinction coefficient of undoped VO₂-films is detected and interpreted.

Внимание к изучению механизма фазового перехода изолятор-металл (ФПИМ) в плёнках окислов ванадия порождено присутствием в окислах ванадия сильных межэлектронных корреляций, определяющих комплексный мотт-пайерлсовский характер данного фазового перехода. Прикладное значение исследований плёнок VO₂ обусловлено рекордным (фемтосекундным) быстродействием, которое позволяет использовать их в качестве высокоскоростных оптических лимитеров, а также применять в качестве регистрирующей среды оптических корреляторов. Исследованные нами нанокристаллические плёнки VO₂ толщиной 1000 - 2100 Å были синтезированы на ситалловой подложке толщиной 0,6 мм и площадью 10 x 15 мм² стандартным методом лазерной абляции. AFM-изображение плёнки VO₂ показывает однородность структуры с кристаллитами порядка 100 - 150 нм. Эллипсометрические параметры образцов исследовались при температуре 293 К (20 °С) на эллипсометре с бинарной модуляцией состояния поляризации. На рис. 1 представлены петли термического гистерезиса коэффициентов преломления и экстинкции нелегированных плёнок VO₂ на длине волны $\lambda = 632,8$ нм в

интервале температур 20 - 100 °С, соответствующем области совершения комплексного мотт-пайерлсовского ФПИМ.

Интерпретация данного факта основана на утверждении о зависимости показателя преломления такого сильно коррелированного полупроводника, как VO_2 , от концентрации свободных электронов [1]. Такое поведение оптических констант $k(T)$ и $n(T)$ обусловлено, по нашему мнению, двумя факторами. Во-первых, нагревным сдвигом в коротковолновую сторону минимума в спектре поглощения изолирующей фазы на 658.8 нм (1.884 eV). Сам минимум обусловлен L-провалом в энергетической зависимости функции плотности состояний (ФПС) [2]. L-провал смещается вверх по энергии благодаря росту кулоновского взаимодействия между электронами при термическом росте их концентрации [3]. Во-вторых, одновременно со смещением L-провала вверх по энергии область ФПС вблизи уровня Ферми смещается вниз по энергии. Одновременно уменьшается ширина запрещённой зоны, что является следствием корреляционных эффектов [4]. Из этого следует, что рост концентрации свободных электронов приводит к расширению энергетического диапазона, занимаемого функцией плотности состояний. При температурном росте концентрации свободных электронов перемещение L-провала вверх через энергию линии излучения зондирующего лазера 632.8 нм (1.96 eV) приводит сначала к уменьшению коэффициента экстинкции $k(T)$ (рис. 1б), а затем с «выходом» линии 632,8 нм из L-провала – к его увеличению. Такое перемещение L-провала создает, кроме того, немонотонность изменения ветвей петли гистерезиса $n(T)$ (рис. 1а) ввиду наличия связи между $n(T)$ и $k(T)$.

Работа частично поддержана МО РФ в рамках Госзадания по проекту №FSZN-2020-0026.

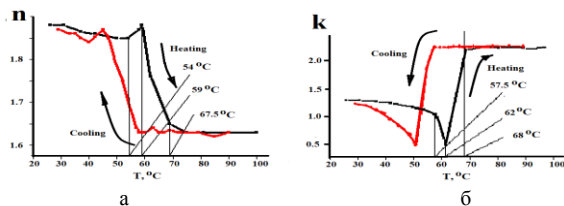


Рис. 1. Петли температурного гистерезиса показателя преломления (а) и коэффициента экстинкции (б) нелегированной плёнки VO_2 на $\lambda = 632,8$ нм

Список литературы

1. Moss T.S., Burrell G.J., Ellis B. *Semiconductor Opto-Electronics*. 1973. P. 454.
2. Ильинский А.В., Квашенкина О.Е., Шадрин Е.Б. // ФТП. 2012. V. 46 (4). P. 439.
3. Arinyan V., Kope'c T.K. // *J. Low. Temp Phys*. 2015. V. 178. P. 295.
4. Batista C., Ribeiro R.M., Teixeira V. // *Nanoscale Research Letters*. 2011. V. 6 (1). P. 301.

А.В. ГОРБАТОВА, А.М. БУРЯКОВ, М.С. ИВАНОВ
МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

**ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК-
ПАРАЭЛЕКТРИК В НОВОМ ОРГАНИЧЕСКОМ
МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ
НА ОСНОВЕ СОЕДИНЕНИЯ YbZn**

Методом нелинейно-оптической микроскопии исследована кристаллическая симметрия органического магнитоэлектрического комплекса YbZn и область температурного фазового перехода из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую. Из температурной зависимости интенсивности сигнала второй гармоники была определена температура фазового перехода $T_c \approx 338$ К. В парамагнитной фазе наблюдается заметный остаточный сигнал второй гармоники, который может быть связан с наличием квадрупольного вклада.

A.V. GORBATOVA, A.M. BURYAKOV, M.S. IVANOV
MIREA - Russian Technological University, Moscow

**THE FERROELECTRIC-PARAELECTRIC PHASE
TRANSITION IN AN NOVEL ORGANIC MAGNETOELECTRIC
COMPLEX BASED ON THE YbZn COMPOUND**

The crystal symmetry of the organic magnetoelectric complex YbZn and the region of the temperature phase transition from the ferroelectric phase to the paraelectric phase have been investigated by the method of nonlinear optical microscopy. The temperature dependence of the second harmonic signal intensity was used to determine the phase transition temperature $T_c \approx 338$ K. In the paramagnetic phase, a noticeable residual second harmonic signal is observed, which can be associated with the presence of a quadrupole contribution.

Магнитоэлектрические материалы многофункциональны и имеют широкий спектр применений: устройства памяти с высокой плотностью записи, устройства спинтроники, устройства с низким энергопотреблением и др. [1, 2]. Для всех этих приложений основным требованием к магнитоэлектрикам является наличие сильной магнитоэлектрической связи. Традиционные подходы по созданию однофазных магнитоэлектриков основаны на использовании неорганических материалов (оксиды и фториды металла), среди которых есть лишь несколько примеров с сильной магнитоэлектрической связью

при комнатной температуре [2, 3]. В настоящее время органические магнитоэлектрики благодаря своим свойствам, рассматриваются как альтернатива традиционным оксидам металлов [4, 5].

В данной работе методом нелинейно-оптической микроскопии исследована область фазового перехода из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую в новом органическом магнитоэлектрическом комплексе на основе соединения YbZn. Получена серия азимутальных зависимостей сигнала второй оптической гармоники в диапазоне температур от 20 °С до 140 °С. В результате аппроксимации была определена температура $T_c \approx 338$ К фазового перехода сегнетоэлектрик-параэлектрик. Фазовый переход связан с нарушением кристаллической симметрии и переходу к центросимметричной точечной группе 2/m. Наличие заметного остаточного сигнала второй гармоники в параэлектрической фазе может быть связано с наличием квадрупольного вклада в генерацию.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-10233).

Список литературы

1. Wang K.F., Liu J.-M., Ren Z.F. Multiferroicity: the coupling between magnetic and polarization orders // *Adv. Phys.* 2009. V. 58. № 4. P. 321-448.
2. Mandal P., Pitcher M.J., Alaria J., Niu H., Borisov P., Stamenov P., Claridge J.B., Rosseinsky M.J. Designing switchable polarization and magnetization at room temperature in an oxide // *Nature*. 2015. V. 525. № 7569. P. 363-366.
3. Pitcher M.J., Mandal P., Dyer M.S., Alaria J., Borisov P., Niu H., Claridge J.B., Rosseinsky M.J. Tilt engineering of spontaneous polarization and magnetization above 300 K in a bulk layered perovskite // *Science* (80-). 2015. V. 347. № 6220. P. 420-424.
4. Hang T., Zhang W., Ye H.-Y., Xiong R.-G. Metal-organic complex ferroelectrics // *Chem. Soc. Rev.* 2011. V. 40. № 7. P. 3577.
5. Horiuchi S., Tokunaga Y., Giovannetti G., Picozzi S., Itoh H., Shimano R., Kumai R., Tokura Y. Above-room-temperature ferroelectricity in a single-component molecular crystal // *Nature*. 2010. V. 463. № 7282. P. 789-792.

Р.Г. БИКБАЕВ^{1,2}, С.Я. ВЕТРОВ^{2,1}, И.В. ТИМОФЕЕВ^{1,2},
В.Ф. ШАБАНОВ^{1,2}

¹*Институт физики им Л.В. Киренского, ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*
²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

ТАММОВСКИЕ ПЛАЗМОН-ПОЛЯРИТОНЫ ДЛЯ ЗАХВАТА СВЕТА В ОРГАНИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В работе предложена модель органического солнечного элемента на основе таммовского плазмон-поляритона, локализованного на границе активного слоя, допированного плазмонными наночастицами, и многослойного зеркала. Показано, что интегральное поглощение в активном слое может быть увеличено более чем на 10 % по сравнению с оптимизированным планарным солнечным элементом.

R.G. BIKBAEV^{1,2}, S.Ya. VETROV^{2,1},
I.V. TIMOFEEV^{1,2}, V.F. SHABANOV^{1,2}

¹*Kirensky Institute of Physics of FRC KSC SB RAS, Krasnoyarsk*
²*Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

TAMM PLASMON POLARITON FOR LIGHT TRAPPING IN ORGANIC SOLAR CELLS

The report proposes a model of an organic solar cell based on Tamm plasmon polariton localized at the boundary of the active layer doped with plasmon nanoparticles and a multilayer mirror. It is shown that the integral absorption in the active layer can be increased by 10 % compared to the optimized planar solar cell.

Органические солнечные элементы (ОСЭ) на основе сопряжённых полимеров привлекают к себе всё большее внимание в связи с их низкой стоимостью, лёгкостью изготовления и малым весом. Подобные ОСЭ содержат объёмный гетеропереход, вследствие чего идет поиск компромисса между эффективностями поглощения фотонов и транспортировки носителей заряда. Толщина активного слоя, в этом случае, составляет не больше 100 нм, что значительно ограничивает эффективность поглощения падающего света. В связи с этим широкое распространение получили методы увеличения поглощения в активном слое за счёт внедрения в него плазмонных частиц (серебро, золото, медь) или сопряжения ОСЭ с фотонным кристаллом [1].

Новой является идея использования допированного наночастицами активного элемента в качестве зеркала [2]. В этом случае на границе

активного слоя и фотонного кристалла локализуется таммовский плазмон-поляритон (ТПП) [3]. Схематическое изображение предложенного ОСЭ представлено на рис. 1.

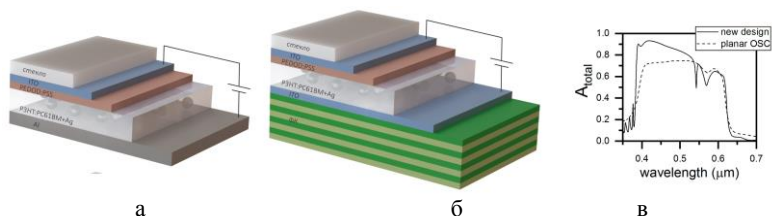


Рис. 1. Схематичное изображение ОСЭ, допированного плазмнными наночастицами (а) и ОСЭ на ТПП (б) и зависимости интегрального поглощения в активном слое от длины волны падающего излучения (в)

Исследуемая нами структура содержит активный слой из РЗНТ:РС61ВМ толщиной 50 нм, допированный серебряными наночастицами с объёмной концентрацией 20 %. В качестве контактов использованы плёнки ИТО с толщинами 15 нм и 45 нм. Элементарная ячейка фотонного кристалла сформирована из двуоксида кремния (SiO_2) и диоксида титана (TiO_2) с толщинами 75 нм и 40 нм, соответственно. Методом трансфер-матрицы было рассчитано интегральное поглощение в активном слое, нормированное на солнечный спектр. Показано, что в предложенной модели ОСЭ интегральное поглощения в исследуемом интервале длин волн увеличивается на 10 % [4], в сравнении с аналогичным планарным ОСЭ. Важно отметить, что дополнительное увеличение интегрального поглощения в исследуемом интервале длин волн может быть достигнуто за счёт нанесения ФК на тонкий металлический слой. В данном случае интегральное поглощение, в сравнении с исходной структурой, может быть увеличено на 16 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых (заявка МК-46.2021.1.2) и при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки в рамках научного проекта № 20-42-240005.

Список литературы

1. Ou Q.-D., et al. // Adv. Sci. 2016. V. 3. P. 1600123.
2. Ветров С.Я., Бикбаев Р.Г., Тимофеев И.В. // ЖЭТФ. 2013. Т. 144. С. 112939.
3. Kalitevski M., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 165415.
4. Бикбаев Р.Г., Ветров С.Я., Тимофеев И.В., Шабанов В.Ф. // ДАН. 2020. Т. 492. С. 54-57.

А.И. ЛИВАШВИЛИ, П.В. ВИНОГРАДОВА, В.В. КРИШТОП¹,
И.С. МАНЖУЛА, М.И. ЯКУНИНА

Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
¹*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ НАНОЖИДКОСТЬЮ В СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ

Работа посвящена возможности моделирования физических процессов, происходящих в процессе работы солнечного коллектора прямого поглощения солнечного излучения, в которой наножидкость является теплоносителем. Получена система уравнений, описывающая процессы переноса тепла и наночастиц. Сформулированы соответствующие граничные условия.

A.I. LIVASHVILI, P.V. VINOGRADOVA, V.V. KRISHTOP¹,
I.S. MANZHULA, M.I. YAKUNINA

Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*

SIMULATION OF RADIATED ENERGY ABSORPTION PROCESSES BY A NANOFLUID IN A SOLAR COLLECTOR

The paper is devoted to the possibility of modeling physical processes occurring during the operation of a solar collector of direct absorption of solar radiation, in which nanofluid is a coolant. A system of equations is obtained that describes the processes of heat and nanoparticle transfer. The corresponding boundary conditions are formulated.

Обычно солнечные коллекторы прямого поглощения (КПП) – это теплообменники, оборудованные светопоглощающей чёрной поверхностью и ёмкостью с жидкостью (теплоносителем), которая используется одновременно для поглощения и отвода тепла. В последнее время в качестве теплоносителя используют наножидкости, которые являются стабильными суспензиями наночастиц в жидкостях (вода, гликоль, минеральное масло) [1, 2]. По своим теплофизическим свойствам такие жидкости напоминают жидкие металлы: высокая теплопроводность, возможность эффективного поглощения солнечного излучения, а также магнитного управления течением, что способствует успешному применению наножидкостей в различных энергетических системах, повышению эффективности отбора тепла до полутора раз. Наличие

прозрачного приёмника позволяет наночастицам поглощать, накапливать и передавать с достаточно большой скоростью базовой жидкости.

Следует также отметить, что в настоящее время нет полной ясности какие из них являются наиболее эффективными. Отчасти это связано с тем, что экспериментальные исследования достаточно сложны, и к тому же, спектр используемых наночастиц имеет большой разброс по своим параметрам. Численное моделирование может способствовать прояснению и уточнению ряда вопросов, связанных с происходящими фототермическими явлениями при конструировании КПП.

Среди представленных публикаций можно выделить работы [1 - 3], в которых описаны численно решаемые двумерные стационарные модели, целью которых было прогнозирование температурных профилей и эффективности изучаемых КПП. В работе [2] был использован двухфазный подход для наножидкостей, помещённой во внешнее магнитное поле. Эти модели были основаны на теории рассеяния Ми и уравнения теплопроводности Фурье без учёта конвективного движения наножидкости.

На наш взгляд, для более полного описания протекающих процессов в солнечном коллекторе, следует также привлечь балансное уравнение, описывающее динамику концентрации наночастиц. Эта необходимость возникает из-за того, что такие физические величины, входящие в уравнение теплопроводности, как коэффициенты теплопроводности, поглощения и конвективная скорость зависят от концентрации наночастиц [4]. Мы не рассматривали, ввиду его малости, слагаемое, отвечающее за эффект Дюфура [5], также не учитываем, так называемый, электрострикционный поток, вызванный действием сил со стороны электрического поля электромагнитной волны.

Полученная система уравнений является существенно нелинейной и вряд ли может быть решена аналитически. Авторы предполагают использовать численные методы для её решения и анализа полученных результатов.

Список литературы

1. Рудяк В. Я. и др. // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19. № 1. С. 75-83.
2. Ni G., et al. // Nano Energy. 2015. Т. 17. P. 290-301.
3. Liu J., et al. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2015. Т. 136. С. 177-186.
4. Рудяк В.Я., Краснолуцкий С.Л. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 6. С. 9-16.
5. Ливашвили А.И. и др. // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 565-566.

А.В. ГОРБАТОВА, А.М. БУРЯКОВ, Е.Д. МИШИНА
МИРЭА - Российский технологический университет, Москва

РАСЧЁТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ПЛАЗМОННЫМ УСИЛЕНИЕМ

Численным методом рассчитано распределение оптического излучения в двумерных полупроводниковых дихалькогенидах переходных металлов в зависимости от дизайна плазмонных структур. Рассчитаны спектральные зависимости коэффициента поглощения, фототока и квантовой эффективности разрабатываемых фотодетекторов в оптическом диапазоне. Определены оптимальные параметры плазмонной структуры, обеспечивающие наибольшую квантовую эффективность устройств. Показано, что за счёт использования плазмонных эффектов чувствительность фотодетектора может быть увеличена в четыре раза.

A.V. GORBATOVA, A.M. BURYAKOV, E.D. MISHINA
MIREA - Russian Technological University, Moscow

CALCULATION OF THE EFFICIENCY OF THE PHOTODETECTORS BASED ON TWO-DIMENSIONAL SEMICONDUCTORS WITH PLASMON AMPLIFICATION

The distribution of the optical radiation in two-dimensional transition metal dichalcogenides is calculated numerically depending on the design of plasmon structures. Spectral dependencies of absorption coefficient, photocurrent and quantum efficiency of developed photodetectors in optical range were calculated. Optimal characteristics of the plasmon structures providing the highest efficiency of the devices have been determined. It was shown that due to the use of optimal plasmon elements the efficiency of the photodetector can be increased by 4 times.

Поиск методов усовершенствования оптических и электрофизических характеристик двумерных полупроводниковых материалов является одной из наиболее актуальных проблем наноэлектроники на сегодняшний день. Несмотря на высокое поглощение оптического излучения монослойными полупроводниковыми плёнками (по сравнению с традиционными материалами), квантовая эффективность фотодетекторов на их основе остаётся низкой. Одним из наиболее перспективных путей

решения данной задачи является использование плазмонных структур на поверхности функциональных двумерных плёнок [1-4]. Плазмонные эффекты открывают возможности для контролируемого изменения желаемых параметров фотодетекторов на основе двумерных полупроводниковых плёнок (спектральная и поляризационная селективность) [1, 5].

В данной работе с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics рассчитаны основные рабочие характеристики плазмонных фотодетекторов (оптическое поглощение, фототоки и квантовая эффективность) на основе двумерных дихалькогенидов переходных металлов. Рассмотрено несколько типов плазмонных элементов, отличающихся типом геометрии (цилиндр, параллелепипед, треугольная призма), периодичностью и размерами. На основе рассчитанных спектров поглощения сделан вывод о возможности управления спектральными характеристиками функционального слоя устройства. Показано, что за счёт использования плазмонных элементов оптимальной геометрии можно увеличить эффективность поглощения в четыре раза.

Полученные результаты имеют высокую практическую значимость и могут быть использованы при разработке оптических фотодетекторов нового поколения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 9-72-10149).

Список литературы

1. Butun S., Tongay S., Aydin K. Enhanced light emission from large-area monolayer MoS₂ using plasmonic nanodisc arrays // Nano Lett. 2015. V. 15. № 4. P. 2700-2704.
2. Lin J., Li H., Zhang H., Chen W. Plasmonic enhancement of photocurrent in MoS₂ field-effect-transistor // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 102. № 20. P. 203109.
3. Najmaei S., Mlayah A., Arbouet A., Girard C., Léotin J., Lou J. Plasmonic pumping of excitonic photoluminescence in hybrid MoS₂-Au nanostructures // ACS Nano. 2014. V. 8. № 12. P. 12682-12689.
4. Li B., Zu S., Zhou J., Jiang Q., Du B., Shan H., Luo Y., Liu Z., Zhu X., Fang Z. Single-nanoparticle plasmonic electro-optic modulator based on MoS₂ monolayers // ACS Nano. 2017. V. 11. № 10. P. 9720-9727.
5. Ross M.B., Blaber M.G., Schatz G.C. Using nanoscale and mesoscale anisotropy to engineer the optical response of three-dimensional plasmonic metamaterials // Nat. Commun. 2014. V. 5. № 1. P. 4090.

В.А. ЖЕЛТИКОВ, С. ХЫДЫРОВА, Д.Д. ВАСИЛЬЕВ,
К.М. МОИСЕЕВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СРАВНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ КВАНТОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Проведён сравнительный анализ материалов интегральной платформы КОИС и показано, что наиболее перспективным из рассмотренных является LiNbO_3 .

V.A. ZHELTIKOV, S. HYDYROVA, D.D. VASILIEV, K.M. MOISEEV
Bauman Moscow State Technical University

COMPARISON OF WAVEGUIDE MATERIALS FOR QUANTUM OPTICAL INTEGRATED CIRCUITS

The comparative analysis of the materials of the QPICs platform is carried out and it is shown that the most promising of those considered is LiNbO_3 .

Фотонные квантовые интегральные схемы являются наиболее перспективными в связи с высокой скоростью распространения, а также слабым взаимодействием со средой и друг другом [1].

Показатель преломления материала интегральной платформы n определяет возможность распространения излучения в среде и скорость передачи сигнала.

Высокоскоростная электрооптическая модуляция с низкими потерями может быть обеспечена за счёт электрооптического эффекта Погкельса: $n = n_0 + r \cdot n_0^3 \cdot E/2$, где n_0 – показатель преломления материала без приложения электрического поля, E – напряжённость поля, r – коэффициент Погкельса [1, 2].

Отличный от нуля коэффициент Керра n_2 позволяет создавать компактные однофотонные источники, основанные на четырёхволновом смешении и связан с n выражением $n = n_0 + n_2 \cdot I$, где I – интенсивность луча накачки [1,3].

Ещё одним важным параметром является ширина запрещённой зоны (ШЗЗ). Большая ШЗЗ обеспечивает применение материала в широком диапазоне длин волн благодаря низкому поглощению [2].

В электромагнитные потери КОИС весомый вклад вносит двухфотонное поглощение (коэффициент β), так как при данном

механизме поглощения потери интенсивности излучения I по длине волновода z определяются как: $dl/dz = -\alpha \cdot I - \beta \cdot I^2$, где α – коэффициент поглощения материала [4].

Для проведения сравнительного анализа и выявления наилучшего материала интегральной платформы по рассмотренным критериям в табл. 1 приводятся параметры наиболее распространённых материалов КОИС.

Таблица 1. Сравнительные характеристики материалов КОИС

Параметр	Материал платформы					
	Si	Si ₃ N ₄	GaAs	AlN	LiNbO ₃	Алмаз
n	3,48 [5]	2 [6]	3,37 [5]	2,12 [2]	2,28 [7]	2,4 [8]
ШЗЗ, эВ	1,1 [2]	5,3 [3]	1,52 [9]	6,2 [2]	3,92 [10]	5,48 [8]
n_2 , нм ² /Вт	4,5 [11]	0,26 [3]	15,9 [11]	161 [12]	0,1 [13]	0,2 [15]
r , пм/В	0 [2]	0,3 [6]	1,5 [15]	1 [2]	30 [15]	0 [2]
β , см/ГВт	0,6 [5]	0 [3]	24 [16]	11 [13]	3,5 [17]	0,9 [15]

Проведённый анализ выявляет, что из рассмотренных материалов интегральной платформы наиболее перспективен ниобат лития LiNbO₃, имеющий высокую скорость распространения излучения (в связи с низким показателем преломления), широкое окно прозрачности (благодаря большой ШЗЗ), возможность электрооптической модуляции и приемлемые потери по механизму двухфотонного поглощения.

Список литературы

1. Ferrari S., Schuck C., Pernice W. // *Nanophotonics*. 2018. V. 7 (11). P. 1725-1758.
2. Xiong C., Pernice W., Tang H. // *NanoLett.* 2012. V. 12. P. 3562-3568.
3. Rahium A., Ruckeboer E., et al. // *J. Lightwave Tech.* 2017. V. 35 (4). P. 639-649.
4. Tsang H.K., Liu Y. // *Semicond. Sci. Technol.* 2008. V. 23. P. 9.
5. McCauley J.A., Donnelly V.M., et al. // *Phys. Rev. B*. 1994. V. 49 (11). P. 7408-7417.
6. Puckett M.W., Sharma R., et al. // *Opt. Exp.* 2016. V. 24 (15). P. 16923-16933.
7. Fork D.K., Anderson G.B. // *Appl. Phys. Lett.* 1993. V. 63 (8). P. 1029-1031.
8. Mildren R.P., Rabeau J.R. // *Optical Eng. of Diamond*. 2013. V. 1. P. 1-34.
9. Balaghi L., Bussone G., et al. // *Nat. Comm.* 2019. V. 10. P. 2793.
10. Jianguo Z., Shipin Z., et al. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 1992. V. 4. P. 2977.
11. Dinu M., Quochi F., Garcia H. // *Appl. Phys. Lett.* 2003. V. 82 (18). P. 2954.
12. Zhao M., Hu C.-H., et al. // *Chin. Phys. Lett.* 2016. V. 33 (10). P. 104201.
13. Leidinger M., Fieberg S., et al. // *Opt. Exp.* 2015. V. 23 (17). P. 21690-21705.
14. Kononenko V.V., Konov V.I., et al. // *Q. Electronics*. 2014. V. 44 (12). P. 1099-1103.
15. Wang C., Zhang M., et al. // *Nat. Comm.* 2019. V. 10. P. 978.
16. Villeneuve A., Yang C., et al. // *Q. Electronics*. 1994. V. 30 (5). P. 1172-1175.
17. Beyer O., Maxein D., et al. // *Opt. Lett.* 2005. V. 30 (11). P. 1366-1368.

М.М. МАНДУР¹, С.А. АСТАШКЕВИЧ¹, А.А. КУДРЯВЦЕВ^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Харбинский технологический институт, Китай

ФОТОЭДС В ОДНО- И ДВУХКАМЕРНОЙ ФОТОПЛАЗМЕННЫХ ЯЧЕЙКАХ В СМЕСИ Na-Ar

Используя 2D-симуляцию, исследована эффективность использования двухкамерной газовой ячейки по сравнению с однокамерной с точки зрения получения фотоЭДС в фотоплазме в смеси Na-Ar. Установлена значительная зависимость фотоЭДС от размеров второй (диффузионной) камеры ячейки.

M.M. MANDOUR¹, S.A. ASTASHKEVICH¹, A.A. KUDRYAVTSEV^{1,2}

¹Saint-Petersburg State University

²Harbin Institute of Technology, China

PHOTO-EMF IN A SINGLE- AND TWO-CHAMBER PHOTOPLASMA CELLS IN A Na-Ar MIXTURE

On the basis of 2D simulation, the efficiency of using of a two-chamber gas cell in comparison with a single-chamber one for obtaining photo-EMF in the photoplasma of a Na-Ar mixture is investigated. A significant dependence of the photo-EMF on the size of the second (diffusion) chamber of the gas cell is established.

Была исследована фотоплазма в смеси Na при давлении $p_{\text{Na}} = 0.02$ Торр и Ar при давлении $p_{\text{Ar}} = 1$ Торр в качестве буферного газа с пространственно однородным профилем скорости фотовозбуждения $K_{\text{рез}} = 6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ резонансных уровней Na [1, 2]. Для однокамерной газовой ячейки (рис. 1а) размеры цилиндрической ячейки составляли $L = 2R = 1$ см. Два металлических электрода разделены диэлектриком толщиной 0.1 см. В этой однокамерной конфигурации фотовозбуждение паров натрия происходит во всей камере. L' и L'' – аксиальная длина плавающего потенциала и земли, соответственно, которые изменялись так, чтобы $L'+L'' = 0.9$ см и $L'/L'' = 0.2 - 4$. Моделирование фотоплазмы в такой ячейке показало, что средние значения параметров электронной температуры $T_e = 0.564$ эВ и концентрации $N_e = 3.05 \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и почти не зависят от размеров электродов однокамерной газовой ячейки. На рис. 2 показаны электронная температура и фотоЭДС (разность потенциалов между аксиальными электродами камеры, разделённых изолятором (рис. 1а)) при различных значениях отношения длин L' и L'' . Видно, что абсолютное значение фотоЭДС не превышает 0.3 В.

Далее были изучены параметры фотоплазмы в двухкамерной газовой ячейке (рис. 1б), размеры первой камеры которой были фиксированы и составляли $L_1 = 2R_1 = 1$ см, тогда как размеры второй камеры варьировались. На рис. 3 показана зависимость фотоЭДС этой ячейки от

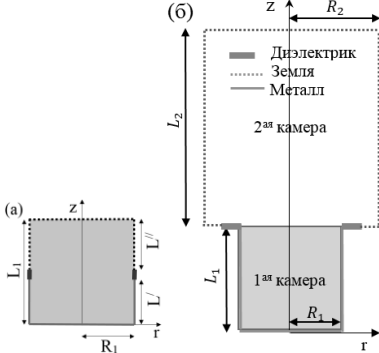


Рис. 1. Геометрия однокамерной (а) и двухкамерной (б) фотоплазменной газовой ячейки

отношения диффузионных длин второй и первой камер Λ_2/Λ_1 , где $\Lambda = (\sqrt{(2.4/R)^2 + (\pi/L)^2})^{-1}$. Для $\Lambda_2/\Lambda_1 < 4$ увеличение фотоЭДС является большим, в то время как для $\Lambda_2/\Lambda_1 > 4$ этот рост довольно мал (меньше 20 %) при увеличении Λ_2 . Этот рост фотоЭДС можно объяснить изменением градиентов T_e и N_e при изменении размеров второй камеры, которые определяют Λ_2 . При этом максимальное значение фотоЭДС достигает почти 3 В.

Можно сделать вывод, что двухкамерная конфигурация более эффективна для создания фотоЭДС в фотоплазменных газовых ячейках по сравнению с однокамерной независимо от геометрии второй камеры.

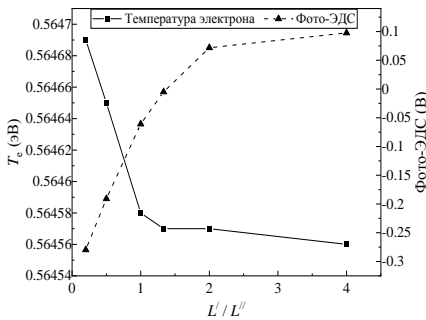


Рис. 2. Зависимость T_e и фотоЭДС от соотношения аксиальных длин электродов L' и L_1 для однокамерной ячейки

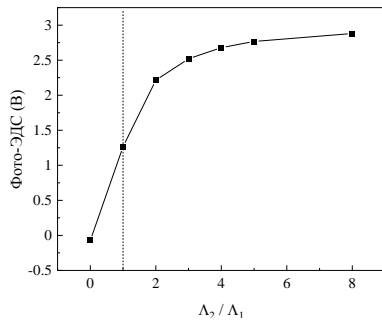


Рис. 3. Зависимость фотоЭДС от отношения диффузионных длин второй и первой камер Λ_2/Λ_1

Список литературы

1. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. № 11. P. 115005.
2. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2021.

М.М. МАНДУР¹, С.А. АСТАШКЕВИЧ¹, А.А. КУДРЯВЦЕВ^{1,2}¹Санкт-Петербургский государственный университет²Харбинский технологический институт, Китай

ГЕНЕРАЦИЯ ФОТОЭДС В ФОТОПЛАЗМЕННОЙ ЯЧЕЙКЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ РАЗЛИЧНЫЕ СМЕСИ ПАРОВ НАТРИЯ И ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

Проведена симуляция фотоплазмы в двухкамерной ячейке, содержащей смесь паров натрия и различных инертных газов. Установлена существенная зависимость фотоЭДС этой ячейки от типа инертного газа и его давления, которая обусловлена неоднородностью пространственного профиля электронной температуры в ячейке.

М.М. MANDOUR¹, S.A. ASTASHKEVICH¹, A.A. KUDRYAVTSEV^{1,2}¹Saint-Petersburg State University²Harbin Institute of Technology, China

GENERATION OF PHOTO-EMF IN A PHOTOPLASMA CELL CONTAINING DIFFERENT SODIUM-NOBLE GAS MIXTURES

A simulation of a two-chamber cell containing a mixture of sodium vapor and various inert gases was carried out. A significant dependence of the photo-EMF in this cell on the type of inert gas and its pressure was established that is due to the inhomogeneity of the spatial profile of the electron temperature in the cell.

Цилиндрическая форма ячейки, содержащей пары Na ($p_{\text{Na}} = 0.02$ Торр) и инертного газа, в настоящей работе не отличалась от приведённой в работе [1] (рис. 1). Резонансное излучение направлено на меньшую камеру, где создается фотоплазма, которая затем в результате диффузии распространяется на вторую камеру с градиентом концентрации электронов. Размеры первой и второй камер: $L_1 = 2R_1 = 1$ см и $L_2 = R_2 = 2$ см, соответственно [2]. Для 2D-симуляции фотоплазмы использовался COMSOL Multiphysics Plasma Module и соответствующий дрейфово-диффузионный интерфейс. Детальная химия плазмы и управляющие уравнения и соотношения приведены в работах [1, 3].

Установлено, что фотоЭДС газовой ячейки (разность потенциалов первой и второй камер этой ячейки) зависит не монотонно от давления инертного газа p при $p = 0.1 - 5$ Торр для всех инертных газов, за исключением He, для которого имеет место монотонное увеличение фотоЭДС с ростом p (рис. 2). Это связано с пространственным профилем

электронной температуры T_e , неоднородность которого сильно влияет на фотоЭДС. Этот профиль существенно неодороден для $p > 1$ Торр, особенно для тяжёлых газов (Ar, Kr и Xe) (рис. 3). При относительно низких давлениях ($p \leq 1$ Торр) этот профиль является однородным для более лёгких газов (для смеси Na-Ne – рис. 3а), в отличие от более тяжёлых газов (для смеси Na-Kr – рис. 3б).

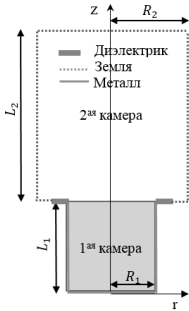


Рис. 1. Геометрия двухкамерной газовой ячейки

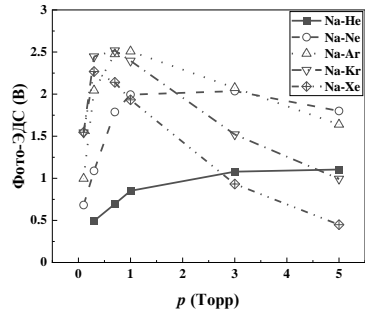


Рис. 2. ФотоЭДС для смеси Na-X при разных давлениях p инертного газа X

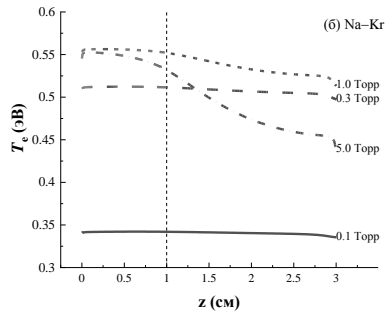
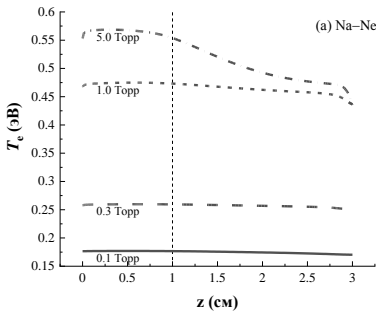


Рис. 3. Пространственные профили электронной температуры T_e на центральной оси газовой ячейки для смеси Na-Ne (а) и смеси Na-Kr (б)

Список литературы

1. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2020. V. 29. № 11. P. 115005.
2. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. № 2. P. 402.
3. Mandour M.M., Astashkevich S.A., Kudryavtsev A.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. V. 48. № 2. P. 394.

А.Н. ХОПЕРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ,
О.Б. АНДРЕЕВА

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

РАСЩЕПЛЕНИЕ ФОТОНА В ПОЛЕ АТОМНОГО ИОНА

Теоретически предсказан эффект расщепления жёсткого рентгеновского фотона на два фотона в поле атомного иона. Результаты расчёта могут оказаться важными, в частности, при интерпретации спектров эмиссии от горячих астрофизических объектов [1].

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV,
O.B. ANDREEVA

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

SPLITTING OF A PHOTON IN THE FIELD OF AN ATOMIC ION

The effect of splitting a hard x-ray photon into two photons in the field of an atomic ion is theoretically predicted. The calculation results may be important, in particular, when interpreting emission spectra from hot astrophysical objects.

На примере гелиоподобного атома неона (Ne^{8+} , заряд ядра иона $Z = 10$, конфигурация и терм основного состояния $[0] = 1s^2 [^1S_0]$) в рамках нерелятивистской квантовой теории возмущений методами алгебры операторов рождения (уничтожения) фотонов и теории неприводимых тензорных операторов исследован процесс:

$$\hbar\omega + [0] \rightarrow 1sxp \rightarrow 1s\varepsilon p + \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2.$$

Здесь $\hbar\omega$ ($\hbar\omega_n$) – энергия падающего (рассеянного, $n = 1, 2$) фотона и $x(\varepsilon)$ – энергия электрона сплошного спектра промежуточного (конечного) состояния рассеяния. Этот процесс мы интерпретируем как эффект неупругого (ион переходит в возбуждённое состояние) «расщепления фотона» в поле атомного иона (см. также [2]).

Результаты расчёта четырежды дифференциального сечения рассеяния, $\sigma_{\perp}^{(4)} \equiv d^4\sigma_{\perp} / d(\hbar\omega_1)d(\hbar\omega_2)d\Omega_1d\Omega_2$ (символ « \perp » – векторы поляризации фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния), представлены на рис. 1. Как и в случае нерезонансного однократного [3] комптоновского рассеяния фотона атомом и двойного [4] комптоновского рассеяния фотона свободным электроном, качественной особенностью сечения

рассеяния оказывается его «обрыв» на прямой $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = \hbar\omega - I_{1s}$ (I_{1s} – энергия порога ионизации $1s^2$ -оболочки иона) в плоскости $(\hbar\omega_1; \hbar\omega_2)$. Переход к схемам предполагаемых экспериментов с неполяризованными и поляризованными параллельно плоскости рассеяния фотонами обнаруживает ярко выраженный эффект угловой анизотропии рассеянного излучения с сохранением аксиальной (относительно волнового вектора $\hbar\omega$ -фотона) симметрии рассеяния.

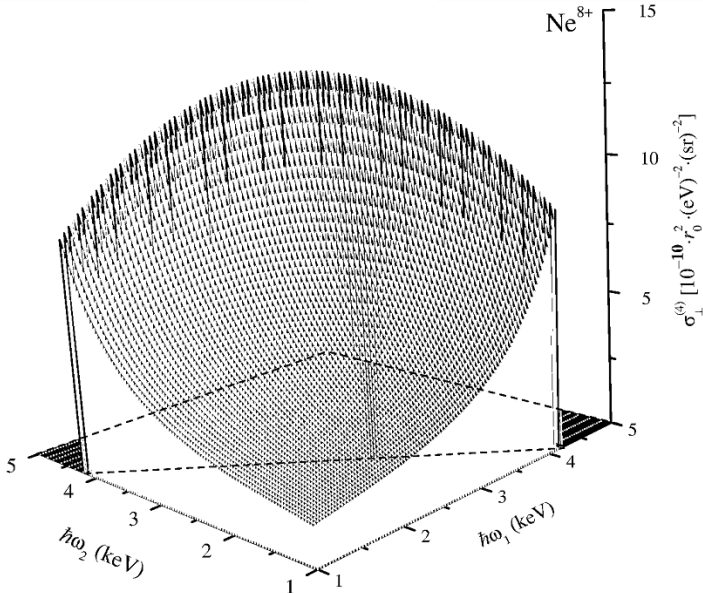


Рис. 1. Четырежды дифференциальное сечение процесса расщепления фотона в поле иона Ne^{8+} : $\hbar\omega = 6.4$ кэВ [энергия $K\alpha$ -линии атома железа (Fe ; [5])], энергия порога ионизации $1s^2$ -оболочки $I_{1s} = 1195$ эВ (релятивистский расчёт данной работы), спектральное разрешение предполагаемого эксперимента не учитывалось

Список литературы

1. Buisson D.J.K., et al. // MNRAS. 2020. V. 498. P. 68.
2. Lötstedt E., Jentschura U.D. // Phys. Rev. Lett, 2012. V. 108. P. 233201.
3. Bergstrom P.M. Jr., et al. // Phys. Rev. A. 1993. V. 48. P. 1134.
4. Lötstedt E., Jentschura U.D. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. P. 110464.
5. Ito Y., et al. // Phys. Rev. A. 2016. V. 94. P. 042506.

В.М. СКОРКИН

Институт ядерных исследований РАН, Москва

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ФОТОНОВ В НАНОКОМПОЗИТЕ ДНК-Au ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Работа посвящена исследованию распространения фотонов в полимерных композитных средах, содержащих ионы металлов. Рассмотрен случай генерации и распространения электромагнитного излучения в жидкокристаллической наноструктуре на основе молекул ДНК и ионов Au при каналировании электронов. Спектр электромагнитного излучения лежит в УФ-области и рентгеновском диапазоне. Определены условия выхода УФ-излучения из композитной среды ДНК-Au.

V.M. SKORKIN

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow

PHOTON DISTRIBUTION IN DNA-Au NANOCOMPOSITE DURING ELECTRON CHANNELING

The work is devoted to the study of the propagation of photons in polymer composite media containing metal ions. The case of generation and propagation of electromagnetic radiation in a liquid-crystalline nanostructure based on DNA molecules and Au ions during electron channeling is considered. The spectrum of electromagnetic radiation lies in the UV and X-ray ranges. The conditions for the release of UV radiation from the DNA-Au composite medium are determined.

Наноконпозиты, содержащие металлы используются для визуализации биологических объектов на клеточном уровне и при лечении онкологических заболеваний методом фотозахватной (ФЗТ), нейтронзахватной (НЗТ) и фотодинамической терапии (ФДТ) [1, 2]. Обладая высокоразвитой структурой, композиты могут взаимодействовать с биообъектами и оказывать прямое воздействие на раковые клетки. Использование органических полимерных матриц обеспечивает биосовместимость наноконпозитов с соразмерными биологическими объектам (клетками, белками, вирусами). На основе ДНК были созданы жидкокристаллические нанодисперсные композиты с включением ионов золота и гадолиния для ФЗТ и НЗТ [3].

Наноконпозиты ДНК-Au, объёмом около 0.1 мкм^3 содержат до десяти тысяч двухцепочечных молекул ДНК длиной $\sim 500 \text{ нм}$ и толщиной 2 нм .

На пару нуклеотидов ДНК в нанокompозите приходится три иона Au. Молекулы ДНК расположены на расстоянии около 5 нм друг от друга, образуя каналы в жидкокристаллической среде ДНК-Au.

В работе исследуется процесс генерации и распространения электромагнитного излучения при каналировании электронов в жидкокристаллическом композите ДНК-Au.

Электроны при пролёте вдоль цепочек ДНК совершают периодические движения вблизи ионов золота и генерируют электромагнитное излучение [4]. Минимальная длина волны фотонов (λ_m) в спектре излучения для осевого канала в узком конусе углов ($\leq 5^\circ$) определяется минимальным расстоянием (r_k) на которое электрон приближается к кристаллографической оси и релятивистским фактором электронов (γ): $\lambda_m \sim r_k/2\gamma^{3/2}$. Для электронов с энергией 1 МэВ и $r_k \approx 2.5$ нм минимальная длина волны электромагнитного излучения составляет $\lambda_m \sim 0.3$ нм. При увеличении амплитуды периодического колебания электрона длина волны электромагнитного излучения начинает зависеть от амплитуды и на больших углах определяется размером нанокompозита ДНК-Au (~ 500 нм). Спектр низкочастотного электромагнитного излучения каналированных электронов находится в ультрафиолетовом диапазоне длин волн ($\sim 100 - 200$ нм).

Композитную среду ДНК-Au можно рассматривать как однородную для распространения и поглощения электромагнитного излучения [5]. При больших углах распространения фотонов относительно цепочек ДНК полоса их поглощения в композите ДНК-Au уменьшается и сдвигается в коротковолновую область электромагнитного излучения [6].

С помощью регистрации фотонов от электронного каналирования можно выполнить раннюю диагностику и осуществить контроль эффективности терапии онкологического заболевания. Жидкокристаллические нанокompозиты ДНК-Au могут быть использованы в терапии и диагностики метастазирования на основе фототермического разрушения циркулирующих раковых клеток.

Список литературы

1. Urusov A.E., Petrakova A.V., et al. // Nanotechnologies in Russia. 2017. No. 11. P. 471.
2. Burmistrov Yu.M., Skorkin V.M. // Journal of Surface Investigation. 2019. V. 13. P. 195.
3. Yevdokimov Yu.M., Salyanov V.I., et al. // J. Biomater. and Nanobiotech. 2011. V. 2. P. 281.
4. Башмаков Ю.А., Бондаренко Т.В., Полозов С.М. // ЖТФ. 2016. Т. 86. С. 118 Р. 158.
5. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. // УФН. 2007. Т. 177. № 6. С. 619.
6. Копьева М.С. и др. // IX межд. конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2020.

А.Н. ХОПЁРСКИЙ, А.М. НАДОЛИНСКИЙ, Р.В. КОНЕЕВ
Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону

О ПОЛЯРИЗАЦИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ КОМПТОНОВСКОМ РАССЕЙЯНИИ ФОТОНА АТОМОМ

Теоретически исследованы типы поляризации тормозного излучения при резонансном комптоновском рассеянии фотона электронами атома. Результаты носят предсказательный характер и важны, в частности, при интерпретации спектров $K\alpha, \beta$ – эмиссии звёзд, галактик и галактических кластеров.

A.N. HOPERSKY, A.M. NADOLINSKY, R.V. KONEEV
Rostov State Transport University, Rostov-on-Don

ON THE POLARIZATION OF BREMSSTRAHLUNG RADIATION IN RESONANT COMPTON SCATTERING OF A PHOTON BY AN ATOM

The types of polarization of bremsstrahlung radiation during resonant Compton scattering of a photon by atomic electrons are theoretically investigated. The results are predictive and important, in particular, when interpreting the emission spectra of stars, galaxies, and galactic clusters.

В работе авторов [1] теоретически предсказана лидирующая роль эффекта тормозного излучения при резонансном комптоновском рассеянии жёсткого рентгеновского фотона многоэлектронным атомом. Результаты [1] получены для схемы эксперимента, когда векторы поляризации падающего и рассеянного фотонов перпендикулярны плоскости рассеяния. В данном сообщении мы обобщаем теорию работы [1] на другие типы поляризации тормозного излучения. В качестве объекта исследования взят атом неона (конфигурация и терм основного состояния $1s^2 2s^2 2p^6 [^1S_0]$).

Исследован процесс $\hbar\omega + [0] \rightarrow Q(^1P_1) \rightarrow 2p_j^5 \epsilon p(^1S_0, ^1D_2) + \hbar\omega_c$, где $\hbar\omega$ ($\hbar\omega_c$) – энергия падающего (рассеянного) фотона, $[0]$ – основное состояние атома, Q – промежуточные (виртуальные) состояния ионизации атома, $j=1/2, 3/2$ и $^1S_0, ^1P_1, ^1D_2$ – результирующие термы

состояний процесса рассеяния. Состояние $Q = 1sxp({}^1P_1)$ рождает $K\alpha$ -эмиссию (переход $1s \rightarrow 2p_j + \hbar\omega_C$). Состояния $Q = 2p_j^5x(s, d)$ рождают тормозное излучение (переход $x(s, d) \rightarrow \varepsilon p + \hbar\omega_C$). Терм 1P_1 конечного состояния рассеяния исключён требованием инвариантности интеграла Гаунта при преобразовании инверсии (сохранение чётности фиксированного состояния перехода).

Методами алгебры операторов рождения (уничтожения) фотонов, теории неприводимых тензорных операторов и теории неортогональных орбиталей для полного (сумма по термам 1S_0 и 1D_2) дважды дифференциального сечения исследуемого процесса получаем:

$$\frac{d^2\sigma}{d(\hbar\omega_C)d\Omega_C} = \left(\frac{r_0}{3}\right)^2 \cdot \frac{\omega_C}{\omega} \sum_j \eta_j M_j.$$

Здесь угловые множители в полной амплитуде вероятности рассеяния $\sim \sqrt{M_j}$ из [1] теперь модифицированы появлением параметра угловой анизотропии тормозного излучения («» – символ скалярного произведения): $\mu = (\hat{e}_1 \cdot \hat{e}_2)^2$, $\mu \in [0; 1]$, где \hat{e}_1 (\hat{e}_2) – единичный вектор поляризации падающего (рассеянного) фотона.

Как результат, для экспериментов с линейно поляризованными перпендикулярно и параллельно плоскости рассеяния фотонами имеем $\mu = 1$ и $\mu = \cos^2 \theta$, соответственно (θ – угол рассеяния). В свою очередь, для эксперимента с неполяризованными фотонами получаем $\mu = (1/2)(1 + \cos^2 \theta)$. Как и следовало ожидать, вероятность «чистой» $K\alpha$ -эмиссии не зависит от θ угла рассеяния (изотропия эмиссии при рождении сферически-симметричного состояния $1s$ -вакансии). Заметим, что параметр μ формально математически воспроизводит таковой для процессов упругого томпсоновского, аномально-дисперсионного (рэлеевского) и нерезонансного комптоновского рассеяния фотона электронами атома.

Список литературы

1. Hopersky A.N., et al. // JETP Letters. 2020. V. 111. P. 72.

Е.А. ВИКТОРОВ¹, А.А. ПАСТОР¹, П.Ю. СЕРДОБИНЦЕВ¹,
Н.Н. БЕЗУГЛОВ^{1,2,3}, К. МИЧУЛИС^{3,4}, И.И. РЯБЦЕВ²

¹*Санкт-Петербургский государственный университет*

²*Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова, Новосибирск*

³*Латвийский университет, Рига, Латвия*

⁴*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ОСЦИЛЛЯЦИИ ФОТОТОКОВ ПРИ ФОТОИОНИЗАЦИИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ АТОМОВ Ar И Xe В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Ионизация многофотонно возбуждённых состояний атомов Ar и Xe, полученных с помощью фемтосекундного импульса проба циркулярной поляризации, исследована теоретически и экспериментально в сверхзвуковом пучке. Наши результаты демонстрируют возможность реализации спектроскопических измерений в обход ограничений, налагаемых Допплеровским уширением линий.

Е.А. VIKTOROV¹, А.А. PASTOR¹, P.Yu. SERDOBINTSEV¹,
N.N. BEZUGLOV^{1,2,3}, K. MICULIS^{3,4}, I.I. RYABTSEV²

¹*Saint-Petersburg State University*

²*Rzhanov Institute of Semiconductor Physics SB RAS, Novosibirsk*

³*University of Latvia, Riga*

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)*

OSCILLATIONS OF PHOTOCURRENT SIGNALS UPON PHOTOIONIZATION OF POLARIZED Ar AND Xe ATOMS IN MAGNETIC FIELDS

Ionization of multi-photon excited polarized states of Ar and Xe atoms by circularly polarized femtosecond probe light was studied theoretically and experimentally in a supersonic beam. Our results indicate the possibility of implementing Doppler-free spectroscopy.

Анализ сигналов флуоресценции при возбуждении поляризованных состояний атомов поляризованным светом составляет важный раздел современной спектроскопии, призванный существенным образом расширить возможности оптической диагностики газовых сред [1]. Наблюдение магнитных резонансов лежит в основе конструирования и реализации чувствительных магнитометров [2]. Появление различных типов осцилляционной структуры при регистрации интенсивности

рассеянного света в присутствии магнитного поля позволяет осуществлять прецизионные измерения параметров атомных состояний в обход ограничений, накладываемых явлением Допплеровского уширения линий. Традиционные методы спектроскопии связаны с возбуждением связано-связанных оптических переходов [1]. В настоящем сообщении мы демонстрируем экспериментально и теоретически возможность наблюдения осцилляций фототоков при фотоионизации поляризованных атомных состояний атомов аргона и ксенона в сверхзвуковом пучке.

В данной работе мы использовали «pump-probe» эксперимент с трёхфотонным возбуждением атомов Аргона в состояние $3s^23p^5(^2P_{3/2})3d[7/2]_3$ (jl -связь [3]) с азимутальным квантовым числом $M = 3$ и двухфотонным возбуждением атомов Ксенона в состояние $5p^5(^2P_{3/2})6p[5/2]_2$ с азимутальным квантовым числом $M = 2$. Возбуждение осуществлялось излучением право-циркулярной поляризации титан-сапфирового фемтосекундного лазера на длине волны 263,8 и 256.01 нм соответственно. Фотоионизация возбуждённых атомов осуществлялась также право-циркулярно поляризованным излучением. При изменении задержки t обнаруживались периодические осцилляции интенсивности тока фотоэлектронов на первых двух Ларморовских частотах $k\omega_L$ ($k = 1, 2$) (рис. 1).

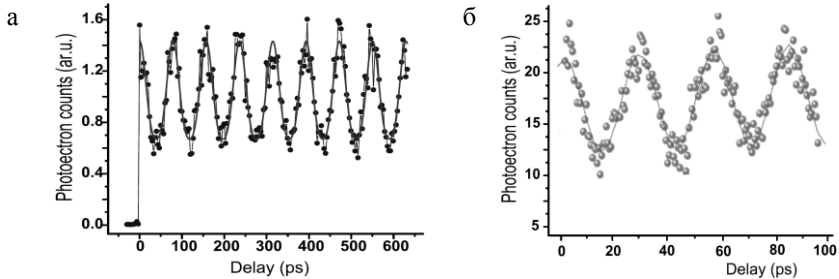


Рис. 1. Зависимость фототока электронов I от времени задержки для Ar (а) и Xe (б), точки соответствуют экспериментальным данным, а сплошная линия теоретическому расчёту

Список литературы

1. Auzinsh M., Budker D., Rochester S., *Optically polarized atoms. Understanding light-atom interactions.* Oxford University press, 2010.
2. Alexandrov E. B., Auzinsh M., Budker D., Kimball D.F., Rochester S.M., Yashchuk V. *Dynamic effects in nonlinear magneto-optics of atoms and molecules: review // J. Opt. Soc. Am. B.* 2005. V. 22. P. 7-20.
3. Sobelman I. *Atomic Spectra and Radiative Transitions.* Springer Series on Atoms+Plasmas. V. 12. Springer Berlin Heidelberg, 1992.

С.В. ПИЧКУРЕНКО, В.В. ФИЛАТОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

ВЫНУЖДЕННАЯ (СТИМУЛИРОВАННАЯ) ГЕНЕРАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В РЕЗОНАНСНОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИКРОПОЛОСТИ

В работе установлена возможность получения лазерной гравитационной генерации в лабораторных условиях. Обнаружено, что при внешнем оптическом возбуждении резонансной твердотельной микрополости монохроматическим электромагнитным излучением соответствующей длины волны в микрополости формируется высокочастотная гравитационная волна, амплитуда которой нелинейно возрастает с увеличением времени экспозиции. Результаты открывают возможность создания лабораторных источников высокочастотных (оптических) гравитационных волн.

S.V. PICHKURENKO, V.V. FILATOV

Bauman Moscow State Technical University

STIMULATED GRAVITATIONAL WAVE GENERATION IN THE RESONANT SOLID MICROCAVITY

In the paper, we propose the solid-state technique to get the stimulated generation of gravitational waves at a laboratory. To do this, one should radiate the resonant optical microcavity of a photonic crystal by the monochromatic (laser or LED) source with wavelength matched to the crystal's bandgap edge. This way, in the nearest-to-the surface microcavity, there forms the high-frequency (doubled the source one) gravitational wave with time-rising amplitude. The results are essential for the gravitational lasing.

На основе общей теории относительности установлено, что под действием лазерного излучения в одномерной оптической твердотельной микрополости формируется гравитационная волна, описываемая волновым уравнением с квадратичным электромагнитным источником:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{11} = - \frac{16\pi G}{c^4} \varepsilon_0 E^2, \quad (1)$$

где E – величина электрического поля в микрополости, h – возмущение метрики пространства-времени, обусловленное присутствием электромагнитного поля.

Согласно формуле Даламбера [1] решение данного уравнения есть

$$\begin{aligned}
 h_{11}(x, t) &= -\frac{c}{2} \int_0^t d\tau \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} \left(-\frac{16\pi G}{c^4}\right) \varepsilon_0 E^2(\zeta, \tau) d\zeta + \\
 &+ \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} \left. \frac{\partial h_{11}}{\partial t} \right|_{(\xi, 0)} d\xi + \frac{h_{11}(x+ct, 0) + h_{11}(x-ct, 0)}{2} = \quad (2) \\
 &= \frac{8\pi\varepsilon_0 G}{c^3} \int_0^t d\tau \int_{x-c(t-\tau)}^{x+c(t-\tau)} E^2(\zeta, \tau) d\zeta,
 \end{aligned}$$

поскольку до включения лазерного источника ($t = 0$) электромагнитное поле в полости отсутствовало.

Как нами было установлено ранее [2], при возбуждении микрополости непрерывным лазерным излучением с длиной волны, соответствующей размеру микрополости, в последней формируется стоячая электромагнитная волна

$$E(x, t) = E_0(t) \sin kx \cdot \sin \omega t, \quad (3)$$

амплитуда E_0 которой возрастает с течением времени по закону $E_0(t) \sim t^{1/2}$. Таким образом, сформированное в микрополости гравитационное поле (2) представляет собой стоячую гравитационную волну с амплитудой, нелинейно увеличивающейся с течением времени. Полученный результат свидетельствует о нахождении условий режима вынужденной (стимулированной) гравитационно-волновой генерации.

Работа выполнена при поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-2423.2021.2).

Список литературы

1. Физическая энциклопедия <http://femto.com.ua/> (дата обращения: 16.10.2020).
2. Пичуренко С.В., Филатов В.В. Локализация и усиление электромагнитного поля в микрополостях глобулярного фотонного кристалла // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 6. С. 582-584.

В.А. КОЖЕВНИКОВ, В.Е. ПРИВАЛОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого***МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ He-Ne ЛАЗЕРА
С СЕЧЕНИЕМ ТРУБКИ В ВИДЕ ЭЛЛИПСА**

На основании предложенного ранее метода оценки мощности излучения He-Ne лазера для произвольного поперечного сечения активного элемента, посчитана мощность лазера с поперечным сечением трубки в виде эллипса. Результаты расчётов дают хорошее согласие с предшествующими расчётами усиления такого лазера.

V.A. KOZHEVNIKOV, V.E. PRIVALOV

*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University***OUTPUT POWER OF He-Ne LASER WITH TUBE
OF ELLIPTICAL CROSS SECTION**

On the basis of the previously proposed method for estimating the radiation power of a He-Ne laser for an arbitrary cross-section of an active element, the power of a laser with a tube cross-section in the form of an ellipse was calculated. The calculation results are so good with preliminary calculations of the laser gain.

Используя предложенный в [1] метод расчёта мощности излучения He-Ne лазера, мы рассмотрели мощность излучения He-Ne лазера с эллиптическим сечением трубки. В эллиптических координатах (u, v, z) , (связанных с декартовыми координатами следующими соотношениями: $x = \rho \cdot \operatorname{ch}(u) \cdot \cos(v)$, $y = \rho \cdot \operatorname{sh}(u) \cdot \sin(v)$, $z = z$, $\rho = \text{const} > 0$, $u \geq 0$, $0 \leq v < 2\pi$), эта мощность будет иметь следующий вид (где a и b – полуоси эллипса, $Ce_0(u, q)$ и $ce_0(v, q)$ – функции Матье (используются обозначения [2]), R_e – радиус кривизны соответствующего эквивалентного конфокального резонатора, $w(z) = \{(R_e + 4z^2 / R_e) / k\}^{1/2}$, k – волновое число):

$$P = \gamma \iiint_{NMV(u,v,z)} dz dv du (a^2 - b^2) \frac{\operatorname{sh}^2(u) + \sin^2(v)}{w^2(z)} \cdot Ce_0\left(u, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)\right) \cdot ce_0\left(v, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)\right) \cdot \exp\left[\frac{-2(a^2 - b^2)}{w^2(z)} (\operatorname{sh}^2(u) + \cos^2(v))\right]$$

где z отсчитывается от перемычки гауссового пучка,

$$\gamma = \frac{2E_0^2 \delta N_0 \varepsilon R_e}{k \cdot \text{Ce}_0(0, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2)) \cdot \text{ce}_0(\frac{\pi}{2}, \frac{\lambda^2}{4}(a^2 - b^2))}, \quad \delta N_0 - \text{инверсия}$$

населённостей активной среды на оси трубки, E_0 – значение модуля напряжённости поля на оси при $z = R_e/2$, параметр λ – минимальное

решение уравнения $\text{Ce}_0\left(\frac{1}{2} \ln \frac{a+b}{a-b}, \frac{\lambda^2(a^2 - b^2)}{4}\right) = 0$, а интегрирование

происходит по эффективному модовому объёму NMV , громоздкое уравнение границы которого для эллиптического сечения приведено в [3].

Результаты расчётов мощности излучения находятся в хорошем согласии с расчётами усиления такого лазера из работы [4] – мощность лазера с эллиптическим сечением несколько меньше мощности лазера с цилиндрической трубкой при той же площади поперечного сечения (и длине трубки), и эта разность монотонно растёт с ростом отношения a/b .

Список литературы

1. Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Shemanin V.G. Effective mode volume evolution in the He-Ne laser. // Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EEExPolytech). Saint Petersburg, 2019.P. 272-274.
2. Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables. Edited by M. Abramowitz, I.A. Stegun. National Bureau of Standards, Tenth Printing, 1972.
3. Kozhevnikov V.A., Privalov V.E., Shemanin V.G.. Radiation power of He-Ne Laser with different geometry of the tube cross section // Springer Proceedings in Physics. V. 255. Proceedings of the YETI. 2020. P. 343-350.
4. Кожевников В.А., Привалов В.Е. Влияние геометрии сечения активного элемента лазера на усиление его излучения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 84-95.

Е.Е. АЛЕКСЕЕВ, Н.М. АНДРОНОВА¹, С.Ю. КАЗАНЦЕВ^{1,2}
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва
¹*Московский технический университет связи и информатики*
²*Московский политехнический университет*

РАСЧЁТ ПОРОГА РАЗВИТИЯ ПАРАЗИТНОЙ ГЕНЕРАЦИИ В ДИСКОВЫХ Fe:ZnSe ЛАЗЕРАХ ПРИ НЕОДНОРОДНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ

Представлены результаты численного исследования порога развития паразитной генерации и термоупругих напряжений в Fe:ZnSe лазерах дисковой геометрии при использовании неравномерного профиля легирования. Показано, что за счёт выбора специального профиля легирования можно существенно увеличить выходную энергию и мощность этих лазеров за счёт подавления паразитной генерации в поперечном направлении.

E.E. ALEKSEEV, N.M. ANDRONOVA¹, S.Yu. KAZANTSEV^{1,2}
National Research Center Kurchatov Institute, Moscow
¹*Moscow Technical University of Communications and Informatics*
²*Moscow Polytechnic University*

THE THRESHOLD OF PARASITIC TRANSVERSAL GENERATION IN Fe: ZnSe DISK LASERS WITH INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OF THE DOPANT

The results of a numerical study of the threshold for the development of parasitic generation and thermoelastic stresses in Fe: ZnSe lasers of disk geometry using a nonuniform doping profile are presented. It is shown that by choosing a special doping profile it is possible to significantly increase the output energy and power of these lasers by suppressing parasitic generation in the transverse direction.

В настоящее время, Fe:ZnSe лазеры являются перспективными источниками мощного излучения в средней ИК-области спектра [1, 2]. Основными факторами, которые ограничивают максимальную импульсную и среднюю мощность дисковых Fe:ZnSe лазеров являются: эффекты возникновения паразитной генерации и разрушение активного элемента [3]. Целью работы являлось численное исследование влияния профиля легирования кристалла Fe:ZnSe на порог возникновения паразитной генерации и максимальную величину термоупругих напряжений, возникающих при импульсной оптической накачке дисковых

Fe:ZnSe лазеров. Численное моделирование проводилось для кристаллов Fe:ZnSe с концентрацией ионов Fe в слое толщиной 1 мм в диапазоне $N_0 = 10^{18} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Были рассмотрены случаи: 1) ионы железа равномерно распределены в слое толщиной 1 мм, расположенном внутри кристалла ZnSe; 2) легирование кристалла атомами железа осуществлялось в четырёх внутренних слоях, выполненных по периодической маске в виде шашек, как описано в [4]. На рис. 1а для двух профилей легирования представлены зависимости пороговой инверсной населённости для паразитной генерации от диаметра пятна накачки d для дисков Fe:ZnSe диаметром $D = 20$ и 40 мм при концентрации ионов железа $N_0 = 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Здесь N_g^t – пороговая инверсная населённость, при которой возникает генерация вдоль оптической оси; N_p^t – пороговая инверсная населённость при которой развивается паразитная генерация по нормали к оптической оси. На основе численного моделирования установлено, что при использовании «шашечного» профиля легирования, порог развития паразитной генерации значительно повышается. Кроме того, как видно из рис. 1б, неоднородный в поперечном направлении «шашечный» профиль легирования приводит к меньшим деформациям кристалла в сравнении с равномерным легированием в одном слое [4].

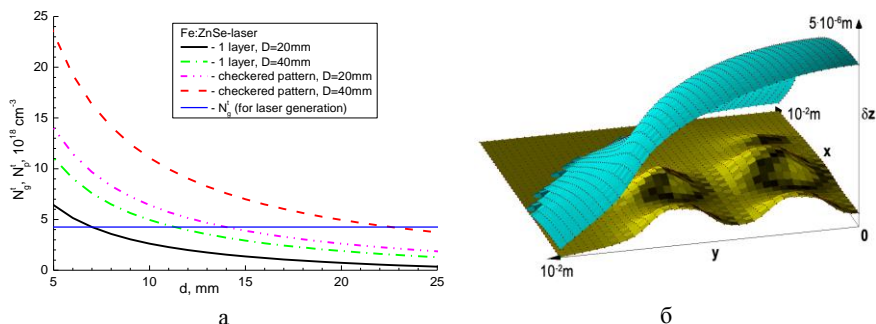


Рис. 1. Пороговая инверсная населённость для паразитной генерации N_p^t от диаметра пятна накачки d , рассчитанных для разных диаметров дискового лазера D . N_g^t – пороговая инверсная населённость для генерации дискового лазера (а), зависимость деформации верхней границы кристалла для равномерного (верхняя кривая) и шашечного профиля легирования [4] (б)

Список литературы

1. Mirov S.B., et al. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. V. 24(5). P. 1-29.
2. Velikanov S.D., et al. // Quantum Electronics. 2017. V. 47. P. 303.
3. Dormidonov A.E., et al. // Appl. Phys. B. 2016. V. 122. P. 211.
4. Alekseev E.E., Kazantsev S.Yu., Podlesnikh S.V. // Opt. Mater. Express. 2020. V. 10. P. 2075.

Ю.К. СЕДОВА^{1,2}, С.А. МИНАЕВА², Н.В. МИНАЕВ²,
Е.Д. МИНАЕВА^{1,2}, Е.В. ИВАНОВСКАЯ³, Т.С. ДЕМИНА⁴

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

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

³Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

⁴Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН,
Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОЧАСТИЦ ГИДРОКСИАПАТИТА В ОБЪЁМЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ МЕТОДОМ СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ

Приведены результаты экспериментов по исследованию биосовместимых полимерных микрочастиц, содержащих гидроксиапатит, которые могут быть применимы для формирования искусственных конструкций – матриц для восстановления костной ткани в тканевой инженерии. Для различных типов микрочастиц с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния получены спектральные карты распределения гидроксиапатита в объёме образцов. Исследована зависимость распределения компонентов в составе частиц в зависимости от условий их формирования.

Yu.K. SEDOVA^{1,2}, S.A. MINAEVA², E.D. MINAEVA^{1,2},
N.V. MINAEV², E.V. IVANOVSKAYA³, T.S. DEMINA⁴

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

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

³Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

⁴Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials of the RAS, Moscow

STUDY OF THE DISTRIBUTION OF HYDROXYAPATITE NANOPARTICLES WITHIN POLYMERIC MICROPARTICLES BY THE METHOD OF RAMAN SPECTROSCOPY

Biocompatible polymer microparticles containing hydroxyapatite nanoparticles were fabricated for future formation of artificial scaffolds for bone tissue engineering and studied. Various types of microparticles were investigated in terms of distribution of hydroxyapatite nanoparticles over sample volume using Raman spectroscopy. Distribution of components within the composite microparticles was evaluated as a function of particle fabrication conditions.

Разработка новых биоматериалов является актуальной задачей. Биоматериалы востребованы в тканевой инженерии для формирования матриц, необходимых для восстановления повреждённых или утраченных фрагментов биоткани. В частности, для стимуляции восстановления костной ткани востребованы материалы, содержащие наночастицы гидроксиапатита (нГА), так как он является основным неорганическим компонентом костной ткани. Микрочастицы на основе алифатических полиэфиров, содержащие нГА могут быть основой для дальнейшего формирования из них трёхмерных конструкций, способствующих восстановлению костной ткани.

В работе исследовались гибридные микрочастицы, содержащие нГА, полученные методом испарения растворителя из эмульсии масло / вода с использованием раствора полилактида или поликапролактона в качестве масляной дисперсной фазы (рис. 1). В дисперсную фазу или дисперсионную среду вводили нГА для получения микрочастиц со структурой матрица / наполнитель или ядро / оболочка, соответственно.

Целью работы является исследование распределения нГА в микрочастицах в зависимости от условий их формирования и типа используемого полимера.

Исследование распределения компонентов внутри микрочастиц проводилось методом спектрального картирования на спектрометре комбинационного рассеяния Thermo Nicolet Almega XR Raman. Размер и форма частиц исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа Phenom ProX. Подготовка срезов микрочастиц для анализа их внутренней структуры осуществлялась на ультрамикротоме Leica EM UC7. На рис. 1 приведены микрофотографии микрочастиц и их среза.



Рис. 1. Микрофотография полимерных микрочастиц (а) и их среза (б)

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 и ИСПМ РАН в части исследования материалов из алифатических полиэфиров.

Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, М.Н. КОВАЛЕНКО, Л.В. МАРКОВА,
А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск

ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ Al_2O_3 С УГЛЕРОДОМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Исследованы процессы образования нанодисперсных порошков Al_2O_3 с углеродом в электрической дуге постоянного тока между электродом из алюминиевого сплава Д16Т и угольным электродом в атмосфере воздуха. Исследовано влияние силы тока дуги на плазменно-дуговой синтез алюминий-углеродного материала, прекурсора для получения полых наночастиц Al_2O_3 . Оценены температуры на оси дуги и в области образования Al_2O_3 по эмиссионным спектрам Cu и субоксидов AlO в зависимости от силы тока дуги.

N.A. ALEKSEENKO, M.N. KOVALENKO, L.V. MARKOVA,
A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk

PROCESSES OF FORMATION OF NANODISPERSE Al_2O_3 POWDERS WITH CARBON IN A DC ELECTRIC ARC

The processes of formation of nanodispersed Al_2O_3 powders with carbon in a DC electric arc between an aluminum alloy D16T electrode and a carbon electrode in an air atmosphere are studied. The effect of the arc current on the plasma-arc synthesis of an aluminum-carbon material, a precursor for producing hollow Al_2O_3 nanoparticles, is studied. The temperatures on the arc axis and in the region of Al_2O_3 formation are estimated from the emission spectra of Cu and AlO suboxides depending on the arc current strength.

Одним из перспективных методов получения полых наночастиц оксидов алюминия является плазменно-дуговой синтез алюминий-углеродного материала (прекурсора) при использовании электрической дуги постоянного тока между электродами из сплавов алюминия и углерода в атмосфере воздуха.

Динамика образования субоксидов AlO в плазме электрического разряда исследована нами с использованием наиболее интенсивных электронно-колебательными полос AlO в эмиссионных спектрах с длинами волн AlO (484,21 нм) и (486,5 нм), при времени горения дуги

15 с (25 съёмов по 0,6 с). На рис. 1а приведены зависимости интенсивности полос АЮ от силы тока, а на рис. 1б температуры на оси дуги (1) и в области образования субоксидов алюминия (2) от силы тока электрической дуги постоянного тока.

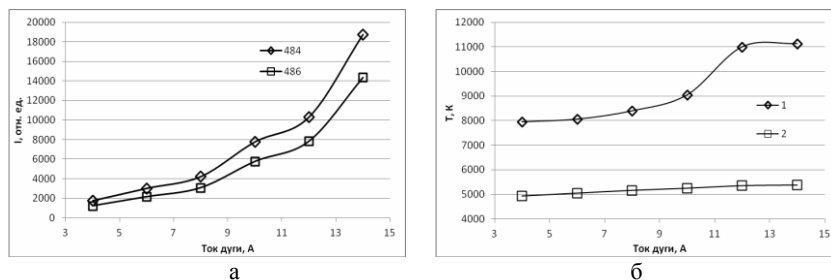


Рис. 1. Зависимости интенсивности полос АЮ (а) и температуры на оси дуги (1) и в области образования субоксидов алюминия (2) от силы тока электрической дуги постоянного тока (б)

Образование оксидов алюминия ограничивается строго определённым диапазоном термодинамических параметров: давлением, температурой, концентрацией продуктов диссоциации в газовой фазе и наличием или отсутствием конденсированной фазы. При температуре более 4800 К обеспечивается практически полная диссоциация оксида алюминия Al_2O_3 до оксидов АЮ и Al_2O . Температура разложения АЮ 4400 К.

Спектры излучения молекул, как правило, удаётся наблюдать и анализировать при температурах плазмы не выше $T_{max} \approx 8\,000 \div 12\,000^\circ K$. В то же время по оценкам, выполненным на основе отношения интенсивностей спектральных линий Cu (510 нм) к Cu (515 нм), электронная температура на оси рассматриваемой плазменной струи оказывается не ниже $8\,000 \div 10\,000^\circ K$ (см. рис. 1б). В таких условиях можно считать, что за присутствие в спектре молекулярной составляющей в момент наибольшего энерговклада преимущественно ответственна периферийная область. В настоящей работе для оценки температуры периферийной части плазмы, где происходит формирование радикалов АЮ использовано отношение интенсивности полос 486 нм к 484 нм (см. рис. 1а). Исследования влияние силы тока дуги на плазменно-дуговой синтез алюминий-углеродного материала, прекурсора для получения полых наночастиц Al_2O_3 показало, что с увеличением силы тока от 4 до 14 А количество продукта увеличивается почти на порядок, несмотря на конкурирующие процессы диссоциации АЮ при увеличении температуры от 5000 до 5500 К (кривая 2 на рис. 1б).

Х. БАЗЗАЛ, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, Е.С. ВОРОПАЙ,
М.Н. КОВАЛЕНКО, М.П. ПАТАПОВИЧ, А.П. ЗАЖОГИН
Белорусский государственный университет, Минск

**ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ Al_2O_3
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА АЛЮМИНИЙ СЕРИЯМИ
СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Изучено влияние количества сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование оксидов алюминия в лазерной плазме (спектрометр LSS-1). При проведении экспериментальных исследований установлено, что наибольшая интенсивность полос субоксида AlO наблюдается при 40 - 50 последовательных сдвоенных импульсов в серии. С использованием энергии импульсов 52 мДж и интервала 10 мкс получены нанопорошки Al_2O_3 . Размер первичных частиц, оценённый с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 30 - 40 нм, частицы собраны в агломераты.

Kh. BAZZAL, E.S. VOROPAY, N.A. ALEKSEENKO,
M.N. KOVALENKO, M.P. PATAPOVICH, A.P. ZAJOGIN
Belarusian State University, Minsk

**PROCESSES OF FORMATION OF Al_2O_3 NANOPOWDERS
WHEN ALUMINUM IS EXPOSED TO A SERIES OF DOUBLE
LASER PULSES IN THE AIR**

The effect of the number of double laser pulses on the targeted formation of aluminum oxides in laser plasma (LSS-1 spectrometer) was studied. During experimental studies, it was found that the highest intensity of AlO suboxide bands is observed at 40 - 50 consecutive double pulses in a series. Al_2O_3 nanopowders were obtained using a pulse energy of 52 mJ and an interval of 10 microseconds. The size of primary particles estimated by high-resolution electron microscopy was mainly 30 - 40 nm, and the particles were collected in agglomerates.

Развитие методов синтеза наночастиц (НЧ) с требуемыми свойствами, главными из которых являются размер, форма, химический состав, структура и степень агломерации НЧ, является важной практической задачей. Динамика образования ионов Al , радикала AlO и наночастиц AlN исследована при воздействии серий (120 импульсов) сдвоенных лазерных

импульсов на алюминиевую мишень из алюминия марки АД1. Мишень размещалась в прямоугольной стеклянной кювете, размером 40 x 20 x 30 мм, накрытой крышкой. При проведении экспериментальных исследований установлено, что наибольшая интенсивность полос наблюдается для интервала между импульсами 9 - 15 мкс. Результаты, полученные при энергии импульсов 52 мДж, и интервала между импульсами равном 10 мкс приведены на рис. 1а. Номер суммы на рисунке представляет собой сумму десяти последовательных импульсов

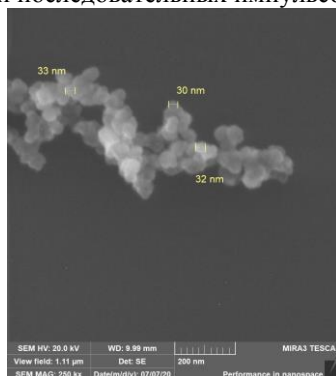
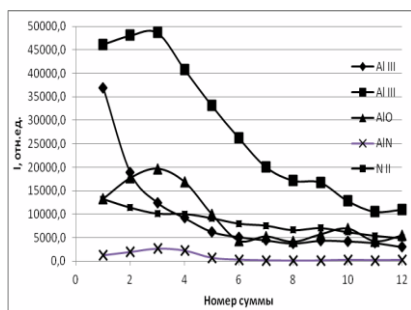


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от номера суммы (а); изображения наночастиц и агломератов, осаждённых на подложку (б)

Как видно из данных процесс образования радикалов AlO и наночастиц AlN существенно увеличивается при количестве импульсов до 50, а далее несколько уменьшается. Наличие резкого временного порога скорости образования радикалов AlO и наночастиц AlN указывает на то, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала.

Для оценки возможности практического получения нанопорошков Al₂O₃ облучение проводили сериями из 50 удвоенных импульсов на одну точку в закрытой стеклянной кювете. Изображения наночастиц и агломератов наночастиц, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max приведены на рис. 1б. Размер первичных частиц, оценённый с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 30 - 40 нм, частицы собраны в агломераты. Частицы имеют кристаллическую структуру и сферическую форму.

Х. БАЗЗАЛ, Н.А. АЛЕКСЕЕНКО, Е.С. ВОРОПАЙ,
М.Н. КОВАЛЕНКО, Н.Х. ЧИНЬ, А.П. ЗАЖОГИН

Белорусский государственный университет, Минск

**ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДИРОВАННЫХ
НАНОПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
НА АЛЮМИНИЙ КОРОТКИМИ СЕРИЯМИ СДВОЕННЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Изучено влияние количества сдвоенных лазерных импульсов на состав лазерной плазмы. Установлено, что наибольшая интенсивность линий ионов Al наблюдается при малом, порядка 15 импульсов, последовательных сдвоенных импульсов в серии. С использованием энергии импульсов 52 мДж и интервала 10 мкс получены оксидированные нанопорошки Al. Размер первичных частиц, оценённый с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 50 - 60 нм, частицы собраны в агломераты.

Kh. BAZZAL, E.S. VOROPAY, N.A. ALEKSEENKO,
M.N. KOVALENKO, N.H. TRINH, A.P. ZAJOGIN

Belarusian State University, Minsk

**PROCESSES OF FORMATION OF OXYDEZED ALUMINUM
NANOPOWDERS WHEN ALUMINUM
IS EXPOSED TO A SHORT SERIES
OF DOUBLE LASER PULSES IN THE AIR**

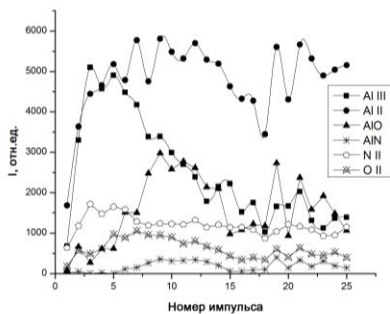
The effect of the number of double laser pulses on the composition of the laser plasma is studied. It is found that the greatest intensity of Al ion lines is observed for small, about 15 pulses, consecutive double pulses in a series. Oxidized Al nanopowders were obtained using a pulse energy of 52 mJ and an interval of 10 microseconds. The size of primary particles estimated by high-resolution electron microscopy was mainly 50 - 60 nm, and the particles were collected in agglomerates.

Одним из самых перспективных материалов для решения задачи создания возобновляемых источников энергии (ВИЭ) может быть порошок из наночастиц алюминия, защищённых тонким слоем Al_2O_3 .

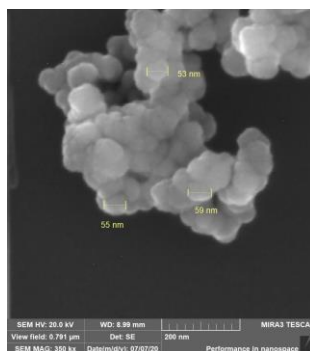
Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Динамику процессов образования нанопорошков при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на пластинку из алюминиевого сплава АД1

исследовали в атмосфере воздуха в зависимости от энергии (10 - 60 мДж) и временного интервала между сдвоенными импульсами (0 - 100 мкс).

Исследования показали, что наблюдается очень сильная зависимость скорости образования нанокластеров алюминия и продуктов взаимодействия их с кислородом и азотом от количества последовательных сдвоенных импульсов (глубина микроканала). Результаты исследований, полученные при использовании энергии импульсов, равной 52 мДж и интервале 10 мкс, представлены на рис. 1а.



а



б

Рис. 1. Зависимость интенсивности линий от количества импульсов (а); изображения наночастиц и агломератов осевших на дно кюветы (б)

Наибольшая интенсивность линий, принадлежащих ионам Al, наблюдается в интервале 1 - 15 импульсов, в то время как молекулы субоксида AlO и нанокластеры AlN начинают эффективно образовываться при 7 - 10 импульсах. При меньшем числе импульсов образование продуктов значительно меньше, что может объясняться эффективным удалением частиц из пока ещё мелкого кратера за счёт конвективных потоков воздуха. Для оценки возможности практического получения оксидированных нанопорошков Al облучение проводили сериями из 15 сдвоенных импульсов на одну точку в закрытой стеклянной кювете. Изображения наночастиц и агломератов наночастиц, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max приведены на рис. 1б. Размер первичных частиц, оценённый с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 50 - 60 нм, частицы собраны в агломераты. Частицы имеют кристаллическую структуру и сферическую форму.

В.А. ШКУРАТОВА, Г.К. КОСТЮК, М.М. СЕРГЕЕВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕЙ ФАЗОВОЙ ПЛАСТИНЫ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ МИКРОПЛАЗМОЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ВЕКТОРНЫХ ПУЧКОВ

Показана простая и эффективная технология изготовления двулучепреломляющей фазовой пластины лазерно-индуцированной микроплазмой на кристалле CaCO_3 . Тестирование изготовленной пластины подтвердило возможность её использования для преобразования Гауссова пучка с линейной поляризацией в векторные пучки с радиальной и азимутальной поляризацией.

V.A. SHKURATOVA, G.K. KOSTYUK, M.M. SERGEEV
ITMO University, Saint-Petersburg

FABRICATION OF BIREFRINGENT PHASE PLATE BY LASER-INDUCED MICROPLASMA FOR GENERATING VECTOR BEAMS

The simple and efficient fabrication technology of birefringent phase plate on CaCO_3 by laser-induced microplasma is demonstrated. Testing of fabricated plate confirmed its ability to convert linearly polarized Gaussian beam into vector beams with radial and azimuthal polarization.

В последние годы значительное внимание уделяется созданию векторных пучков, используемых при манипулировании металлическими и диэлектрическими частицами, в микроскопии сверхвысокого разрешения, при охлаждении атомов, а также в прецизионной лазерной микрообработке материалов [1 - 3]. Многообещающим направлением решения задачи преобразования высокомоощных Гауссовых пучков в векторные пучки с радиальной и азимутальной поляризацией представляется применение двулучепреломляющей фазовой пластины (ДФП), выполненной на пластине из одноосного кристалла с линейным двулучепреломлением, оптическая ось которого параллельна поверхности пластины (Y-срез) (рис. 1а) [2, 3]. Для изготовления ДФП были предложены лазерное влажное травление тыльной стороны кристаллического кварца [2], для которого характерно низкое качество изготовления, сухое травление индуктивно связанной плазмой газа аргона

с использованием силиконовых масок на кристалле α -BBO [3] и технология фотолитографии с последующим ионным травлением на кристалле YVO_4 [4], являющиеся длительными и сложными процессами.

Мы предлагаем использовать лазерно-индуцированную микроплазму (ЛИМП) для быстрого и эффективного изготовления ДФП на кристалле $CaCO_3$. Экспериментально определённые режимы лазерного облучения позволяют изменять глубину травления пластин $CaCO_3$ в диапазоне до 14 мкм без трещин и сколов в зоне обработки. На изготовление ДФП диаметром 10 мм, состоящей из 20 секторов с шероховатостью 50 нм (рис. 1б), методом ЛИМП затрачивается не более 7 минут. При размещении ДФП между двумя четвертьволновыми пластинами с ортогональной ориентацией медленных осей в оптический путь линейно поляризованного Гауссова лазерного пучка осуществляется его преобразование в пучок с радиальной поляризацией. Для получения азимутально поляризованного пучка в оптическую схему может быть добавлена дополнительная полуволновая пластина. Полученные распределения интенсивности в дальнем поле при тестировании изготовленной ДФП в схеме с He-Ne лазером являются типичными для радиально (рис. 2а) и азимутально (рис. 2б) поляризованных пучков.

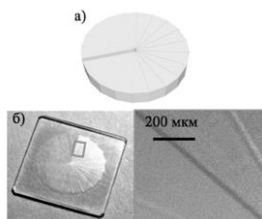


Рис. 1. ДФП: схематический вид (а); результат изготовления (б)

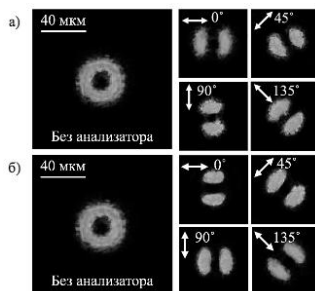


Рис. 2. Распределения интенсивности, полученные с применением ДФП: радиально поляризованного пучка (а); азимутально поляризованного пучка (б)

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-71-10103).

Список литературы

1. Dorn R., et al. // Physical Review Letters. 2003. V. 91 (23). P. 233901.
2. Phua P.B., et al. // Optics Letters. 2007. V. 32 (4). P. 376.
3. Lai W.J., et al. // Optics Express. 2008. V. 16 (20). P. 15694.
4. Wang J., et al. // Optics Express. 2017. V. 25.(11). P. 12531.

А.А. ИОНИН², И.О. КИНЯЕВСКИЙ², Ю.М. КЛИМАЧЕВ²,
А.Ю. КОЗЛОВ², Д.А. КОМАРОВ^{1,2}, О.А. РУЛЕВ², Д.В. СИНИЦЫН²
¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ВНУТРИРЕЗОНАТОРНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ СУММАРНЫХ ЧАСТОТ ИЗЛУЧЕНИЯ СО-ЛАЗЕРА С ВЧ-НАКАЧКОЙ В НЕЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛЕ ZnGeP₂

Исследованы энергетические характеристики излучения основных и суммарных частот СО-лазера с модуляцией добротности резонатора при внутриврезонаторном преобразовании в нелинейном кристалле ZnGeP₂.

A.A. IONIN², I.O. KINYAEVSKY², Yu.M. KLIMACHEV²,
D.A. KOMAROV^{1,2}, A.Yu. KOZLOV², O.A. RULEV², D.V. SINITSYN¹
¹National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)
²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

INTRACAVITY SUM FREQUENCY GENERATION OF RF-DISCHARGE CO LASER IN NONLINEAR CRYSTAL ZnGeP₂

Energetic characteristics of fundamental and sum frequencies radiation of Q-switched CO-laser at intracavity conversion in a nonlinear crystal ZnGeP₂ were investigated.

Разработка источников лазерного излучения среднего ИК-диапазона представляет большой интерес для решения ряда научных и прикладных задач, таких как газовый анализ, лазерная химия, разделение изотопов. Эффективным источником такого излучения является СО-лазер, который в режиме модуляции добротности резонатора (МДР) может излучать более 200 линий в одном импульсе генерации [1] для основных колебательных полос ($\lambda = 4.8 \div 7.7$ мкм). Кроме этого, за счёт преобразования излучения СО-лазера в нелинейных кристаллах можно расширить (в диапазон $\sim 2 \div 20$ мкм) и существенно обогатить спектр излучения лазера [2, 3].

В данной работе экспериментально исследовалась внутриврезонаторная генерация суммарных частот излучения СО-лазера с высокочастотной (ВЧ) накачкой и МДР в нелинейном кристалле ZnGeP₂. Внутриврезонаторное преобразование позволяет упростить устройство

лазерной системы по сравнению с внрезонаторным и использовать непросветлённый нелинейный кристалл не только как преобразователь частоты излучения СО-лазера, но и как выходное зеркало системы.

Основой для экспериментального стенда являлся многочастотный целевой СО-лазер с ВЧ-накачкой и МДР, в отличие от описанного в работе [3] имеющий буферный объём камеры 30 л и размер пустотелых медных электродов 420 x 25 мм². Межэлектродный промежуток составлял 4 мм, а внутренние поверхности электродов имели золотое напыление. Для охлаждения активной среды через внутренние полости электродов прокачивался жидкий азот. Накачка активной среды осуществлялась ВЧ-генератором Cesar 4020 (Advanced Energy Inc.) с регулировкой частоты следования, длительности и мощности импульсов ВЧ-разряда. Эксперименты проводились при давлении 34 мБар газовой смеси СО:О₂:Не = 3:1:30. Мощность ВЧ-накачки ~ 1 кВт. Длительность импульса накачки 700 мкс, время задержки включения добротности резонатора ~ 100 мкс после окончания импульса накачки. Частота вращения зеркала ~ 135 Гц. В качестве выходного зеркала использовались как сам нелинейный кристалл ZnGeP₂, так и в добавленное к нему одного из диэлектрических зеркал, имеющих коэффициент отражения для основной частоты R = 50 % (M1), R = 75 % (M2), либо R = 90 % (M3).

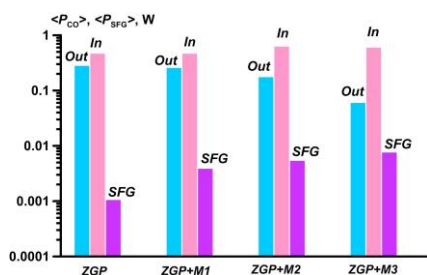


Рис. 1. Средняя мощность излучения

На рис. 1 представлена средняя мощность основной частоты на выходе (Out) и внутри резонатора (In), а также средняя мощность суммарных частот (SFG) излучения СО-лазера для различных выходных зеркал. Чем выше отражения выходного зеркала для основной частоты, тем больше мощность излучения суммарных частот.

Максимальный коэффициент преобразования, определяемый как отношение мощностей излучения суммарных и основных частот СО-лазера внутри резонатора, составил ~ 2.2 %.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 16-19-10619).

Список литературы

1. Puerta J., et al. // Applied Physics. 1979. V. 19. P. 439-440.
2. Ionin A.A., et al. // Optics Express. 2019. V. 27, № 17. P. 24353-24361.
3. Ionin A.A., et al. // Optics and Laser Technology. 2019. V. 115. P. 205-209.

В.Ю. ЖЕЛЕЗНОВ, Т.В. МАЛИНСКИЙ, С.И. МИКОЛУЦКИЙ,
В.Е. РОГАЛИН, С.А. ФИЛИН, Ю.В. ХОМИЧ, В.А. ЯМЩИКОВ,
И.А. КАПЛУНОВ¹, А.И. ИВАНОВА¹

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург
¹Тверской государственный университет

ЛАЗЕРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ БРОНЗЫ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Исследовались следы воздействия сфокусированным частотно-импульсным излучением ультрафиолетового (УФ) NdYаG лазера на полированную поверхность сплава Cu-Cr. Выявлено, что при предпороговых плотностях энергии (при $E \sim 0.5 - 0.8$ Дж/см²), в отсутствие заметного кратерообразования, наблюдались следы высокотемпературной пластической деформации – проскальзывание по границам зёрен и кристаллографическое скольжение. Это визуализирует зернограницную структуру.

V.Yu. ZHELEZNOV, T.V. MALINSKIY, S.I. MIKOLUTSKIY,
V.E. ROGALIN, S.A. FILIN, Yu.V. KHOMICH,
V.A. YAMSHCHIKOV, I.A. KAPLUNOV¹, A.I. IVANOVA¹
Institute for Electrophysics and Electric Power of the RAS, Saint Petersburg
¹Tver State University

LASER ETCHING OF BRONZE BY EXPOSURE TO POWERFUL ULTRAVIOLET PULSES

The traces of exposure to the polished surface of the Cu-Cr alloy by focused pulse-frequency radiation of an ultraviolet (UV) NdYаG laser were studied. It was found that at subthreshold energy densities (at $E \sim 0.5 - 0.8$ J/cm²), in the absence of noticeable crater formation, traces of high-temperature plastic deformation, such as slippage along grain boundaries and crystallographic slip, were observed. This visualizes the grain boundary structure.

На оптическом профилометре Zygo NewView 7300 и растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6610LV исследовались полированные образцы хромистой бронзы Cu-Cr (0.3 - 0.5 %) после воздействия УФ наносекундными импульсами NdYаG лазера ($\lambda = 355$ нм, длительность импульса 10 нс, частота 10 Гц). На рис. 1 приведена РЭМ микрофотография образца после воздействия излучением с $E \sim 0.8$ Дж/см².

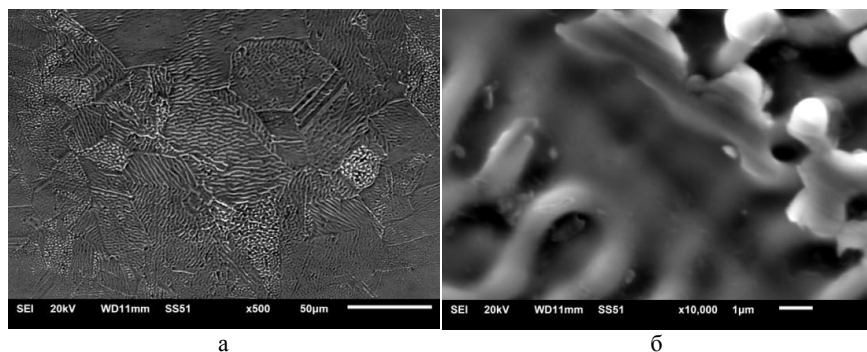


Рис. 1. Поверхность Cu-Sn после воздействия: 30 импульсов с $E \sim 0.8 \text{ Дж/см}^2$ ($\lambda = 0.355 \text{ мкм}$, длительность импульса 10 нс, частота 10 Гц) (а), РЭМ-микрофотографии (б)

Порог появления кратера на бронзе, как и на меди, составлял $\sim 1 \text{ Дж/см}^2$ [1, 2]. Приведены результаты при $E \sim 0.5 - 0.8 \text{ Дж/см}^2$. В отсутствие следов расплава на поверхности отчётливо наблюдается зернограничная структура металла со следами кристаллографического скольжения. Причём, в некоторых зёрнах следы скольжения не наблюдаются.

Мы наблюдали, что границы зёрен слегка растравливаются и поэтому они хорошо видны. Поперечный размер зёрен в образцах бронзы составлял несколько десятков микрометров. Интересные явления наблюдались на полосах скольжения. В некоторых зёрнах на них наблюдалось появление каплевидных структур, причём в соседнем зерне такие образования могли отсутствовать (рис. 1б).

Полученный результат позволяет рекомендовать данный эффект для анализа зернограничной структуры металлов, что на наш взгляд выгодней с экологической точки зрения, нежели химические методы травления.

Список литературы

1. Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. // Письма в ЖТФ, 2020. Т. 46. Вып. 16. С. 51-54.
2. Khomich Yu., Malinskiy T., Rogalin V., Kaplunov I., Ivanova A // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. V. 939. P. 012035.

Ю.А. ГЕРАСИМОВА^{1,2}, Я.В. ГРУДЦЫН², И.О. КИНЯЕВСКИЙ²,
А.В. КОРИБУТ², А.А. РОГАШЕВСКИЙ²

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

ФОРМИРОВАНИЕ СПЕКТРА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ РАЗНОСТНОЙ ЧАСТОТЫ В СРЕДНИЙ ИК-ДИАПАЗОН

Приведены результаты экспериментов по получению широкополосных спектров выходного излучения твердотельного титан-сапфирового лазера. Рассматривается формирование спектров с помощью ВКР-преобразования в кристалле BaWO₄ и уширение спектра в постфиламентационном канале. Результаты данной работы могут быть использованы для получения импульсов субпикосекундной длительности в среднем ИК-диапазоне (10 мкм) с помощью генерации разностной частоты в нелинейных кристаллах.

Yu.A. GERASIMOVA^{1,2}, Ya.V. GRUDTSYN², I.O. KINYAEVSKIY²,
A.V. KORIBUT², A.A. ROGASHEVSKIY²

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

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

THE FORMATION OF SPECTRA FOR DIFFERENCE FREQUENCY GENERATION TO THE MID-INFRARED RANGE

The results on the broadband spectra shaping of the output radiation of a solid-state titanium-sapphire laser system are presented. The formation of the spectra based on stimulated Raman scattering in BaWO₄ crystal and spectrum broadening in a post-filamentation channel are experimentally demonstrated. The results of this work can be used to obtain mid-infrared (10 μm) pulses with subpicosecond duration by difference frequency generation in nonlinear crystals.

Разработка стабильного и простого метода генерации мощных ультракоротких лазерных импульсов среднего ИК-диапазона мотивирована большим диапазоном применения такого излучения: от зондирования атмосферы [1] и спектроскопии [2] до генерации высших гармоник [3].

Одним из подходов к решению этой проблемы является внутриимпульсная генерация разностной частоты излучения видимого и ближнего ИК-диапазона. Такое преобразование требует большой (десятки нанометров) ширины спектра импульса накачки. В данной работе

проводится экспериментальное исследование способов формирования спектрально уширенных импульсов для генерации разностной частоты. Рассмотрены преобразование в нелинейно-оптическом кристалле BaWO_4 и уширение спектра в постфиламентационном канале.

В работах [4, 5] предлагается метод ВКР-преобразования в кристалле BaWO_4 с частотой смещения 925 см^{-1} . В настоящей работе экспериментально реализована генерация Стоксовой компоненты с эффективностью $\sim 2.5\%$ (рис. 1). Спектр получен для следующих условий: длина волны 467 нм , начальная энергия 2.5 мДж , длительность спектрально-ограниченного импульса 0.3 пс , фокусировка в кристалл сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 1.5 м .

Другим способом формирования широкополосного спектра является филаментация излучения в воздухе. В этом случае основной причиной уширения спектра является фазовая самомодуляция, о чём свидетельствует его структура. Наиболее эффективное уширение (рис. 2) наблюдалось для излучения на длине волны 465 нм при начальной энергии 2.5 мДж , длительности 0.3 пс и фокусировке сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 4 м .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (20-32-70015).

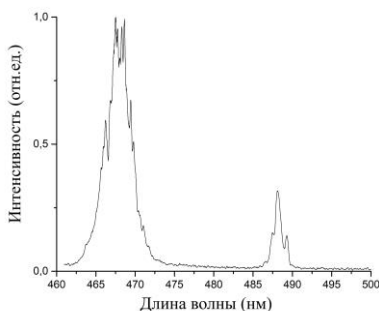


Рис. 1. Спектр излучения после преобразования в кристалле ВВО

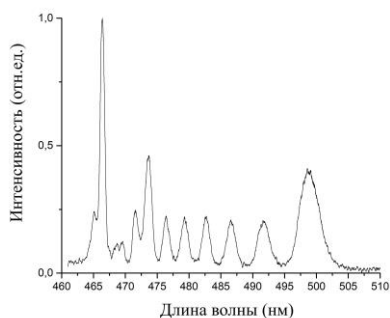


Рис. 2. Спектр излучения ВГ после филаментации в воздухе

Список литературы

1. Mitrofanov A. V., Voronin A. A., et al. // Scientific Reports. 2015. V. 5. P. 8368.
2. Songlin Yu, Dachao Li, et al. // Biomedical Optics Express. 2014. V. 5, P. 275-286.
3. Werner K., Hastings M.G., et al. // Optics Express. 2019. V. 27. P. 2867-2885.
4. Kinyaevskiy I.O., Kovalev V.I., et al. // Optic Letters. 2020. V. 45. P. 2160-2163.
5. Kinyaevskiy I. O., Koribut A.V., et al. // Laser Physics Letters. 2020. V. 17. P. 105402.

С.Ю. КАЗАНЦЕВ^{1,2}, П.А. ТИТОВЕЦ¹, А.И. САТТАРОВА¹

¹*Московский технический университет связи и информатики*

²*Московский политехнический университет*

ПРИЁМОПЕРЕДАТОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОРЕЗИСТОРА С ЛАЗЕРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Создан экспериментальный стенд и отработаны методики исследования характеристик фоторезисторов, составленных из металлических и полупроводниковых элементов. Установлено, что при воздействии лазерного излучения на полупроводниковый элемент удается эффективно управлять волновым сопротивлением антенны. В диапазоне 0.0003 - 3.2 ГГц получены зависимости коэффициента передачи S11 и КСВН фоторезистора.

S. Yu. KAZANTSEV^{1,2}, P.A. TITOVETS¹, A.I. SATTAROVA¹

¹*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

²*Moscow Polytechnic University*

TRANSMISSION CHARACTERISTICS OF HYBRID ANTENNAS WITH LASER CONTROL

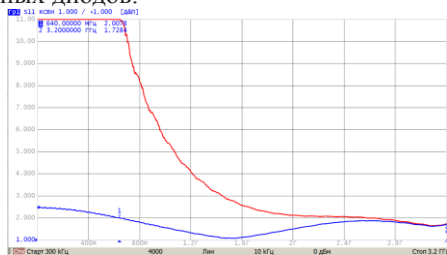
An experimental stand has been created and methods for studying the characteristics of photoresistors composed of metal and semiconductor elements have been developed. It has been found that when a semiconductor element is exposed to laser radiation, it is possible to effectively control the characteristic impedance of the antenna. In the range of 0.0003 - 3.2 GHz, the dependences of the transmission coefficient S11 and the VSWR of the photoresistor are obtained.

В настоящее время чрезвычайно актуальной задачей является проблема оперативного управления параметрами антенн, а также согласования радиотракта с антенной [1]. Для быстрого изменения конфигурации антенны рассматриваются полупроводниковые элементы с лазерным управлением [2, 3], а в качестве элементов схем согласования могут применяться фоторезисторы. Фоторезисторы выполняются из полупроводниковых материалов, в которых за счёт внутреннего фотоэффекта формируется полупроводниковая плазма и изменяется полное волновое сопротивление фоторезистора. В настоящее время, создание компактной системы фоторезистор – лазерный диод достаточно тривиальная задача. Целью работы являлась проверка эффективности применения такого подхода в устройствах согласования антенны с радиотрактом.

Исследовались простейшие антенные элементы, содержащие фоторезисторы в своём контуре. В предварительных экспериментах для отработки методик исследований эксперименты проводились на фоторезисторе MLG5506 соединённым с разъёмом. Лазерный диод ($\lambda = 450$ нм), мощность которого могла регулироваться в диапазоне $P = 0 - 3$ Вт, был установлен на удалении 0.5 м от фоторезистора и засвечивал фоторезистор. Через коаксиальный кабель разъём подключался к измерителю комплексных коэффициентов передачи и отражения ОБЗОР-304/1. Установлено, что зависимости коэффициента передачи S_{11} и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) фоторезистора от интенсивности лазерного облучения были немонотонными и нелинейными. На рис. 1а показан внешний вид фоторезистора, а на рис. 1б показана зависимость КСВН от частоты. Кривая синего цвета отображает КСВН при воздействии лазера мощностью 1,5 Вт, а красного без воздействия лазера в тёмном помещении. Из рис. 1б видно изменение волнового сопротивления при воздействии лазерного излучения, при этом согласование антенны в диапазоне 0,64 - 3,2 ГГц при КСВН не выше 2. В дальнейшем данный подход был использован при создании простейших рамочных антенн, содержащих фоторезистор в своём контуре, при этом в области низких частот согласование антенны было, практически, полным. Таким образом, проведённые исследования подтверждают возможность эффективного управления согласованием антенны с радиотрактом с помощью фоторезисторов и лазерных диодов.



а



б

Рис. 1. Фоторезистор MLG5506 припаянный к разъёму SMA (а); зависимости КСВН от частоты для фоторезистора MLG5506 припаянный к разъёму SMA с воздействием лазера мощностью 1.5 Вт и без него (б)

Список литературы

1. Ротхаммель К. Энциклопедия антенн. М.: ДМК, 2016.
2. Bogachev N.N., Gusein-zade N.G., et al. // Tech. Phys. Lett. 2019. V. 45(12). P. 1223-1225.
3. Bogachev N.N., et al. Plasma antennas formed in a Ge crystal under laser irradiation // Proc. SPIE. 2019, V. 11322. P. 113221P.

В.Г. СРЕДИН, М.В. САХАРОВ¹, Д.С. КОНРАДИ,
И.В. КУЗНЕЦОВ

*Военная академия РВСН им. Петра Великого, Балашиха
¹12 ЦНИИ МО РФ, Сергиев Посад*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В МАТРИЧНОМ ИК-ФОТОПРИЁМНИКЕ В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Методами численного моделирования анализируется влияние свойств подложки на формирование тепловых полей в матричных ИК-фотоприёмниках под действием лазерного излучения.

V.G. SREDIN, M.V. SAKHAROV¹, D.S. KONRADI,
I.V. KUZNETSOV

*Peter the Great Military Academy of Strategic Rocket Forces, Balashikha
¹12 Central Research Institute of Defence Ministry, Sergiev Posad*

NUMERICAL SIMULATION OF THERMAL FIELDS IN MATRIX IR PHOTODETECTORS IN THE LASER RADIATION FIELD

The influence of substrate properties on the formation of thermal fields in matrix IR photodetectors under the action of laser radiation is analyzed using numerical modeling methods.

Современные матричные фотоприёмники создают путем эпитаксиального наращивания фоточувствительных слоёв на кристаллическую подложку, через которую впоследствии осуществляется освещение. К подложке предъявляется ряд требований: прозрачность в рабочем диапазоне спектра, эпитаксиальное соответствие со слоем фоточувствительного материала (близость постоянных решёток и коэффициентов линейного расширения).

Расчёт температурных полей в ИК матричных фотоприёмниках (МФП) обычно основан на решении нестационарного трёхмерного уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями [1 - 3]. В настоящей работе для расчёта использовался пакет программ инженерного анализа ЛЮГОС [4], с помощью которого ранее анализировалось поведение МФП на основе InSb в поле интенсивного

лазерного излучения (ЛИ) [5]. Рассмотрена матрица фотодиодов на основе InSb размерностью 64×64 элемента размером 25×25 мкм каждый с шагом 10 мкм с типичными для МФП размерами [5]. В качестве подложек рассматривались материалы, для которых известны температурные зависимости параметров для $T > 300$ К – Si, Ge, GaAs и InAs [6, 7]. В расчётах моделировалось воздействие импульсного ЛИ с длиной волны 2.94 мкм см^2 с энергией 3,5 мДж в импульсе длительностью 200 мкс, полностью накрывающего один элемент в центре МФП. Результаты расчётов, выполненных с использованием пакета ЛОГОС, для МФП на InSb с различными подложками, приведены на рис. 1 и 2.

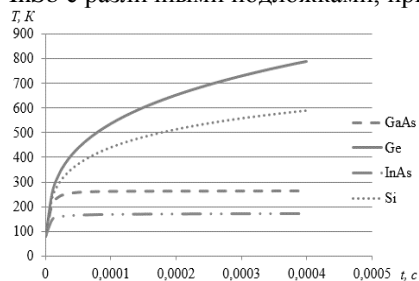


Рис. 1. Зависимость температуры облучаемого пикселя от времени воздействия

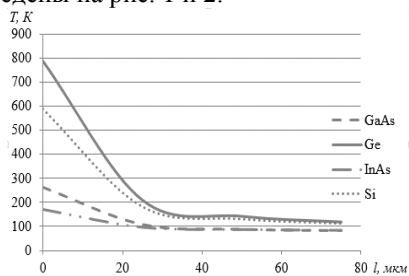


Рис. 2. Зависимость температуры чувствительного слоя МФП от расстояния до точки падения излучения

Как видно из рис. 1 и 2, существует явная зависимость структуры тепловых полей в МФП от выбора подложки, что связано в первую очередь с такими её характеристиками, как коэффициент теплопроводности и удельная теплоёмкость. При увеличении длительности импульса и его плотности мощности возможно растекание тепла вдоль поверхности подложки. Таким образом, при разработке МФП ИК-диапазона при выборе для них подложек следует учитывать их теплофизические свойства.

Список литературы

1. Сахаров М.В., Средин В.Г. и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 9-2. С. 98-101.
2. Средин В.Г., Сахаров М.В. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 5-11.
3. Головань Л.А., Кашкаров П.К. и др. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 931-935.
4. <http://logos.vniief.ru>
5. Средин В.Г., Сахаров М.В., Запонов А.Э., Конради Д.С. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 9. С. 117-122.
6. Oda O. Compound Semiconductors Bulk Materials and Characterizations. NJ, 2006.
7. Madelung O. Semiconductors: Data Handbook. Springer, 2000.

С.В. БОРОВЫХ, А.А. МИТЮРЕВА, В.В. СМИРНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

**РАСЧЁТ ДЕГРАДАЦИИ КАРТИНЫ ДИФРАКЦИИ
МОЩНОГО, УЛЬТРАКОРОТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА H_2^+**

Представлены результаты вычислений деградации дифракционной картины для молекулы H_2^+ под действием ультракороткого рентгеновского излучения сверхатомной интенсивности на основе ранее разработанного квазиклассического траекторного метода.

S. V. BOROVYKH, A. A. MITIUREVA, V. V. SMIRNOV

Saint-Petersburg State University

**DIFFRACTION PATTERN DEGRADATION DRIVEN
BY INTENSE ULTRAFAST X-RAY PULSE FOR H_2^+**

The results of the diffraction pattern degradation calculations for an H_2^+ molecule under the action of ultrashort X-ray radiation of superatomic intensity based on the previously developed semiclassical trajectory method are presented.

С разработкой рентгеновских лазеров на свободных электронах стали доступны новые возможности для изучения материи на атомных масштабах. В настоящей заметке представлены результаты вычислений деградации дифракционной картины молекулы иона водорода под действием рентгеновского импульса. Расчёты проводились на основе квазиклассического траекторного метода, развитого в наших работах [1, 2]. Эффективность метода была ранее продемонстрирована на расчётах фотоионизации атомов водорода [3], гелия [4] и лития [2], а также молекулярного иона водорода [1].

Рассматривался ультракороткий импульс рентгеновского излучения сверхатомной интенсивности. Используется атомная система единиц. Расчёты проводились для длительности импульса $\tau = 30$ (~ 0.8 фс). Интенсивность излучения представлена безразмерным параметром Фейсала χ , который равен отношению дополнительного кинетического импульса электрона в поле излучения к характерному импульсу электрона в атоме. При параметре Фейсала $\chi \ll 1$ поле являются слабыми, $\chi \sim 1$ – промежуточным ("атомным"), $1 < \chi < c$ – сверхатомным с

интенсивностью вплоть до релятивистской, $c \leq \chi$ – поле релятивистской интенсивности, $c = 137$ – скорость света в атомных единицах.

Полученные результаты усреднены по ориентациям оси молекулы к направлению линейно поляризованного излучения. За время длительности импульса межъядерное расстояние практически остаётся неизменным.

На рис. 1 представлены электронные плотности и автокорреляционные функции (АКФ) молекулы водорода для энергии фотона $\omega = 27.2$ keV. Длительность импульса $\tau = 30$ (~ 0.8 фс); t – время в атомных единицах. Параметр Фейсала $\chi = 0.007$ и 72.993 . Расчёты производились для равновесного $R = 1.058$ Å и неравновесного $R = 2.116$ Å состояний.

Из рис. 1 видно, что в сверхатомном поле с $\chi = 7.3$ поля АКФ расширяются из-за делокализации электронов в результате ионизации, однако, даже при очень высокой интенсивности центральная часть АКФ несёт в себе информацию о структуре объекта.

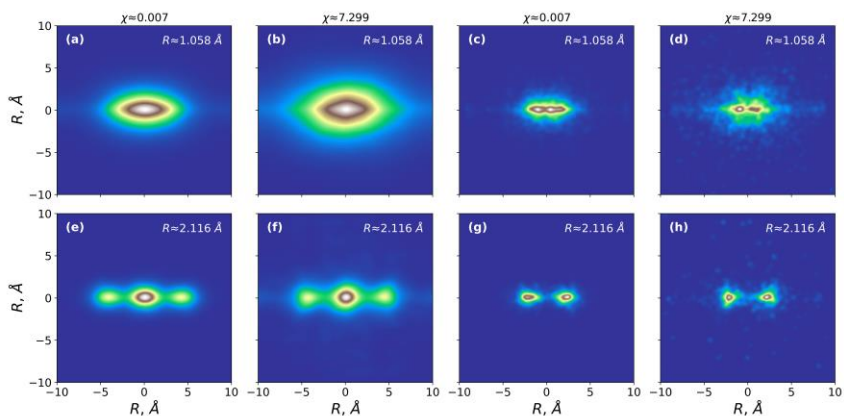


Рис. 1. Электронные плотности и АКФ для сильного и слабого полей: $\chi = 0.007$ и 7.299 для межъядерных расстояний: $R = 1.058$ Å (a - d) и $R = 2.116$ Å (e - h), (a), (b), (e), (f) – АКФы, (c), (d), (g), (h) – распределения электронных плотностей

Список литературы

1. Arkhipov D.N., Astashkevich S.A., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2018. V. 382. № 28. P. 1881-1884.
2. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Mityureva A.A., Rezikyan A.G., Smirnov V.V. // J. Phys. B. 2017. V. 50. № 19. P. 195601.
3. Astashkevich S.A., Borovykh S.V., Mityureva A.A., Smirnov V.V. // Laser Phys. 2020. V. 30. P. 075301.
4. Bichkov A.B., Kozhina A.S., Smirnov V.V. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 1263-1266.

П.В. ВАРЛАМОВ, А.А. САМОХВАЛОВ, Д.В. ИЗМАЙЛОВ
Университет ИТМО, Санкт-Петербург

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АБЛЯЦИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Представлены экспериментальные результаты по исследованию процессов абляции карбида кремния (SiC) предложенным в настоящей работе методом комбинированного воздействия наносекундных лазерных импульсов и углеродной лазерной плазмы. С помощью оптической эмиссионной спектроскопии определены параметры плазмы, возникающей при абляции SiC, исследована морфология абляционных кратеров в SiC, получены интегральные зависимости параметров процесса абляции SiC от параметров лазерного воздействия.

P.V. VARLAMOV, A.A. SAMOKHVALOV, D.V. IZMAILOV
ITMO University, Saint-Petersburg

STUDY OF SILICON CARBIDE ABLATION BY LASER-PLASMA METHOD

Experimental results are presented on the study of the silicon carbide (SiC) ablation with the method of combined action of nanosecond laser pulses and carbon laser plasma proposed in this work. Using optical emission spectroscopy, the parameters of the plasma produced by ablation of SiC were determined, and the morphology of produced craters in SiC was studied. Integral dependences of the parameters of the SiC ablation process on the parameters of laser action are obtained.

Благодаря своим уникальным физическим свойствам [1] карбид кремния (SiC) представляет интерес для задач силовой электроники, МЭМС, создания элементной базы нанофотоники и наноэлектроники. Одним из эффективных методов обработки SiC является метод лазерной абляции [2], его эффективность определяется параметрами лазерного излучения при этом за импульс толщина удалённого слоя составляет ~ 1 мкм [3], что намного эффективнее, чем пучковые методы, но всё ещё недостаточно для внедрения в промышленность. Поэтому логичным направлением развития является разработка комбинированных методов обработки SiC. В настоящей работе демонстрируется новый лазерно-плазменный метод абляции SiC.

Целью работы являлось экспериментальное исследование параметров процесса абляции SiC при его облучении наносекундными лазерными

импульсами. Главной особенностью эксперимента было то, что образец 6H-SiC (толщина ~ 340 мкм) располагался на полированной графитовой подложке (рис. 1а), таким образом, часть лазерного излучения, прошедшего через пластину SiC, служила для инициирования плазмы углерода на графитовой подложке. В экспериментах использовался наносекундный волоконный лазер ИРЭ-Полус ($E_{\text{им}} = 1$ мДж, 1064 нм, 200 нс), фокусировка осуществлялась с помощью f-theta объектива в пятно диаметром ~ 50 мкм.

Использование схемы с фокусировкой на поверхности SiC и графитовой подложкой обуславливало образование абляционных кратеров за одиночный лазерный импульс как на верхней, так и на нижней поверхности пластины SiC, их глубина достигала 1,5 и 0,75 мкм при $32,59$ Дж/см², соответственно. При формировании кратера на нижней поверхности пластины SiC существенную роль играла плазма углерода, и несмотря на поглощение лазерного излучения в пластине SiC глубина кратера на нижней поверхности была в 2 раза меньше, чем на верхней. С помощью анализа эмиссионных спектров, зарегистрированных при абляции SiC были установлены энергетические пороги появления атомов кремния и углерода в спектре образующейся плазмы. Для появления линий кремния требовалась меньшая плотность энергии, что указывает на селективный механизм абляции SiC лазером ближнего ИК-излучения. Кроме того, в плазменном факеле наблюдалась полоса молекулы C₂ (система полос Свана), что может объясняться рекомбинацией возбуждённых атомов углерода как при абляции внешней поверхности пластины SiC, так и при абляции графитовой мишени, находящейся под пластиной SiC.

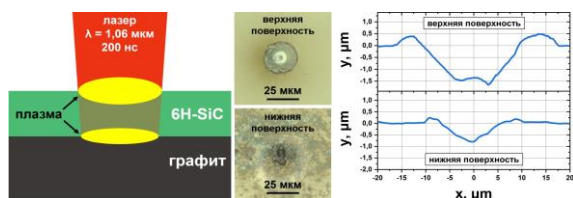


Рис. 1. Схема эксперимента; микрофотографии и профили кратеров, полученных на верхней и нижней поверхности SiC при воздействии импульсом с $E = 32,59$ Дж/см²

Список литературы

1. Lebedev A.A., et al. // Physics-USpekhi. 2019. V. 62 (8). P. 754.
2. Duc D. H., et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013. V. 65. P. 713-718.
3. Gupta S., et al. // Journal of Laser Applications. 2011. V. 23 (1). P. 012008.

С.В. ГАВРИШ, Д.Н. КУГУШЕВ, Д.Ю. ПУГАЧЕВ, С.В. ПУЧНИНА
ООО «НПП «Мелитта», Москва

ИЗМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ ОБОЛОЧЕК ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ КСЕНОНОВОЙ ПЛАЗМЫ

Проведены исследования влияния радиационных воздействий на спектры наведённого поглощения в оболочках разрядных ламп из легированного кварцевого стекла. Показана зависимость радиационно-оптической устойчивости исследованных материалов от состава примесей.

S.V. GAVRISH, D.N. KUGUSHEV, D.Yu. PUGACHEV,
S.V. PUCHNINA
Scientific and Production Enterprise «Melitta», Moscow

MODIFICATION OF THE OPTICAL PROPERTIES OF DOPED QUARTZ ENVELOPES OF PULSED LAMPS UNDER THE INFLUENCE OF XENON PLASMA RADIATION

Studies of the influence of radiation effects on the spectra of induced absorption in the envelopes of discharge lamps made of doped quartz glass have been carried out. The dependence of the radiation-optical stability of the investigated materials on the composition of impurities is shown.

Анализ литературных данных позволяет сделать вывод, что независимо от вида воздействующего фактора изменение оптической прозрачности кварцевой колбы лампы определяется только величиной поглощённой дозы излучения. В данной работе рассматривается радиационно – оптическая устойчивость (РОУ) этого материала со специальными легирующими добавками Ce, Ti, Sn.

Воздействие ионизирующих излучений. Кварцевые оболочки ламп, легированных церием, содержат интенсивную полосу поглощения с максимумом в 315 нм, обусловленную наличием ионов Ce^{3+} в матрице стекла [1]. При этом полоса Ce^{3+} присутствует в спектрах поглощения кварца всех методов изготовления. На рис.1 приведены спектры оптического пропускания церийсодержащего кварца до и после облучения γ -квантами при комнатной температуре. Видно, что при

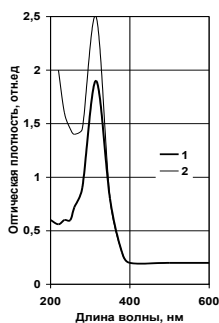


Рис. 1. Оптическая плотность церийсодержащего кварца до (1) и после облучения (2) дозой 10^6 рад

облучении в УФ-диапазоне спектра возникает полоса поглощения в области 215 нм (Е-центр). Одновременно с этим наблюдается уменьшение поглощения ионов Ce^{3+} в полосе 315 нм, в спектре заметен перегиб в области 260 нм (кривая 2). Мы предполагаем, что это связано с возникновением ионов Ce^{4+} с поглощением в области 240 нм [2]. Наличие Ti в церийсодержащем кварце приводит к резкому увеличению коротковолнового поглощения вплоть до 230 – 240 нм. Сильное поглощение в области $\lambda < 230$ нм, связанное с появлением ионов Ti^{4+} , исчезает при введении в стекло ионов Sn^{2+} . Спектр поглощения кварцевых труб, легированных Ce , Ti и Sn , практически совпадает со спектром поглощения образцов, активированных только церием (рис. 1).

Воздействие излучения газоразрядной плазмы. Сопоставление свойств оболочек, активированных Ce , Ti и Sn , с неактивированными образцами показало, что наличие Ce способствует подавлению радиационно-наведённой окраски и центров свечения, характерных для неактивированных кварцевых труб [1]. В результате исследований выявлено, что легирование кварцевых оболочек церием снижает эффективность образования ОН-групп под действием излучения плазмы, что может быть в процессе эксплуатации одной из причин увеличения долговечности ламп. Вхождение водорода при облучении в церийсодержащие кварцевые оболочки служит причиной обесцвечивания центров видимой окраски, поглощающих как в области 550 нм, так и в области 400 нм. Причём роль водорода [2] более значительна, чем влияние на РОУ гидроксильных групп.

В работе установлено, что наличие Ti в церийсодержащих кварцевых оболочках тушит свечение ионов Ce^{3+} , а присутствие ионов Sn^{2+} – способствует просветлению стекла и повышению интенсивности излучения разрядных ламп как в УФ, так и в видимой областях спектра.

Список литературы

1. Климашина Е.В., Прохорова В.С., Хотимченко В.С. Кварцевое стекло со специальными свойствами // Светотехника. 1986. № 10. С. 25-27.
2. Климашина Е.В., Чистосердов В.Г. Влияние малых добавок некоторых элементов на спектральные свойства кварцевого стекла // Физика и химия стекла. 1975. Т. 1. № 2. С. 162-165.

К.И. МАТВЕЕВА, А.С. ЗОЗУЛЯ, А.А. ОГНЕДЮК,
А.Ю. ЗЮБИН, И.Г. САМУСЕВ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

ВАРЬИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАЗМОННЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Представлены результаты исследования оптических свойств, размеров, морфологии поверхности наночастиц сферической формы, синтезированных по многостадийному химическому методу. Рассчитаны молярные концентрации и зарегистрированы максимумы поглощения наностержней.

K.I. MATVEEVA, A.S. ZOZULIA, A.A. OGNEDYUK,
A.Yu. ZYBIN, I.G. SAMUSEV

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

VARIATION OF THE OPTICAL PROPERTIES OF PLASMON STRUCTURES FOR THE PURPOSES OF PHOTODYNAMIC THERAPY

The paper presents the results of a study of the optical properties, dimensions, surface morphology of spheroidal nanoparticles synthesized by a multistage chemical method. The molar concentrations are calculated and the absorption maxima of the nanorods are recorded.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) является передовой и активно развивающейся областью исследований. ФДТ показала свою эффективность в лечении рака, различных злокачественных заболеваний, включая инфекции [1, 2]. Как известно в основе АФДТ лежит фотохимическая реакция, комбинирующая лазерное излучение, фотосенсибилизатор (ФС) и кислород. Совмещение ФС с наноструктурами позволяет повысить степень генерации синглетного кислорода, за счёт энергии поверхностных плазмонов, генерируемых на поверхности стержней, получить более глубокое проникновение в ткани и улучшить доставку ФС к мишени [3].

Целью исследования был обозначен синтез наноструктур сферической формы и исследование их оптических свойств для целей ФДТ и исследование их оптических свойств, размеров и морфологии

поверхности с помощью фотон-корреляционной спектроскопии, спектрофотометрии и сканирующей электронной микроскопии. В работе были исследованы спектры поглощения наночастиц (рис. 1). Было отмечено, что для серебряных наностержней наблюдается характерные два максимума поглощения на 415 и 514 нм. Для золотых наностержней максимумы сдвинуты в длинноволновую область на 536 и 750 нм. Методом фотон-корреляционной спектроскопии было установлено, что средний гидродинамический радиус (рис. 2) для золотых наностержней имеет значение $R_{h(AuNR)} = 21$ нм, для серебряных $R_{h(AgNR)} = 12$ нм.

По результатам экспериментов был проведён отбор наиболее подходящих наночастиц для целей ФДТ.

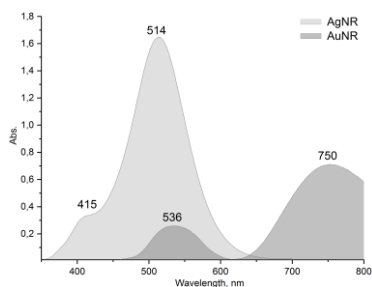


Рис. 1. Спектры поглощения серебряных и золотых наностержней

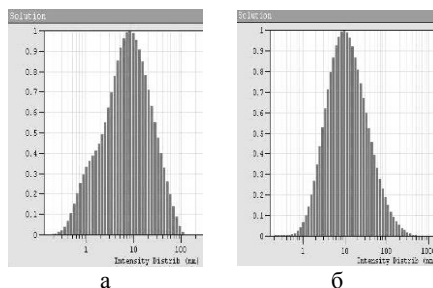


Рис. 2. Средний гидродинамический радиус серебряных (а) и золотых (б) наностержней

Данное исследование было поддержано из средств субсидии, выделённой на реализацию Программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта.

Список литературы

1. Kowada T., Maeda H., Kikuchi K. // Chemical Society Reviews. 2015. V. 44. № 14.
2. Hamblin M.R., Hasan T. // Photochemical & Photobiological Sciences. 2004. V. 3. № 5.
3. Wang P., Tang H., Zhang P. // Scientific Reports. 2016. V. 6. № 1.

Г.Т. МАСЛОВА, А.В. ТИТОВА,
А.П. ЗАЖОГИН, М.П. ПАТАПОВИЧ
Белорусский государственный университет, Минск

МОРФОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И ЛАЗЕРНАЯ АТОМНО-ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОМЕТРИЯ ФАЦИЙ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА

В работе рассмотрены вопросы разработки методик морфологического анализа и полуколичественной оценки локального пространственного распределения кальция в фациях капель плазмы крови человека методом ЛАЭМС. Было найдено, что картины структурирования фаций пациентов с астроцитомой и глиобластомой отличаются между собой и от нормотипа, что является признаком наличия патологии. Показано что морфологический анализ в совокупности с методом ЛАЭМС позволяет с высокой чувствительностью и специфичностью уточнять диагноз, контролировать лечение пациентов с онкопатологией.

G.T. MASLOVA, A.V. TITOVA, A.P. ZAJOGIN, M.P. PATAPOVICH
Belarusian State University, Minsk

MORPHOSTRUCTURAL ANALYSIS AND LASER ATOMIC EMISSION SPECTROMETRY OF PLASMA DROPLET FACIES IN THE DIAGNOSIS OF BRAIN TUMORS

The paper deals with the development of methods for morphological analysis and semi-quantitative assessment of the local spatial distribution of calcium in the facies of human plasma droplets by the method of LAEMS. It was found that the patterns of facies structuring in patients with astrocytoma and glioblastoma differ from each other and from the normotype, which is a sign of the presence of pathology. It is shown that morphological analysis in combination with the LIMS method allows to specify the diagnosis with high sensitivity and specificity, and to control the treatment of patients with cancer pathology.

В механизме патогенеза раковых новообразований главнейшим звеном следует считать нарушение порядка самоорганизации белка на клеточном уровне. В настоящее время в клинической практике используют около двух десятков онкомаркеров (ОМ), обладающих достаточной диагностической значимостью, в то же время неизвестно ни одного ОМ для ОГМ, соответствующего идеальным параметрам. Для получения

однозначного результата требуется тщательное сравнение многочисленных показателей.

В области клинической диагностики быстрыми темпами развивается диагностика патологических состояний организма на основе морфологического анализа фаций БЖ. Микроструктурные параметры представлены неоднородностями по форме, размеру и их расположению в фации. При различных вариантах ОГМ высохшая капля биологической жидкости имеет отличную от здорового человека структуру.

В качестве примера на рис. 1а приведена морфология центральной части высохшей капли плазмы крови пациентов с ОГМ (1 - диффузная астроцитома GII левой островковой доли; 2 - глиобластома GIV правой лобно-височной области ГМ; 3 - донор). На рис. 1б представлены зависимости интенсивности линии кальция в атомно-эмиссионных спектрах плазмы пациентов с диагнозом ОГМ (1, 2).

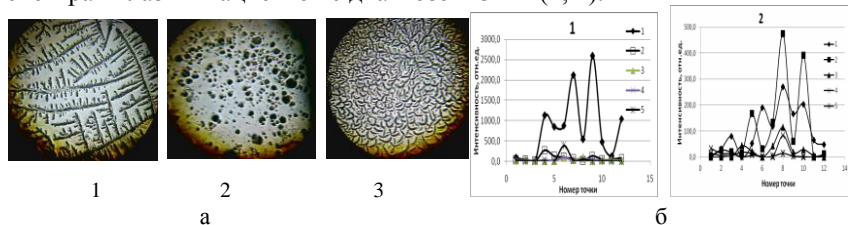


Рис. 1. Снимки фации плазмы крови пациентов (а) и интенсивность линии Са II в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях) (б)

Однородная, равномерная зона мелких завитков характерна для центра фации доноров. При патологии отклонения, обусловленные нарушением стандартных соотношений «белок-соль», вызывают нерегулируемые конформационные изменения, связанные с уникальностью альбумина (наличие amino- и карбоксильных групп в его молекуле – полиамфолитность). Наблюдаем совершенно очевидное существенное отличие структуры фации пациентов от донора.

Очевидны существенные различия и в характере распределения кальция в фации плазмы крови пациентов. В процессе высыхания капель происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям, что свидетельствует об изменении связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция в центре фации и в более глубоких слоях, что не характерно для здорового человека.

Н.В. РОЩИНА, Г.А. КОНОПЛЕВ, О.С. СТЕПАНОВА,
А.И. КУЗНЕЦОВ¹, А. ФРОРИП¹, В. КОРСАКОВ¹,
Г.А. ЗЕМЧЕНКОВ²

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

¹*LDIAMON AS, Тарту, Эстония*

²*Невский нефрологический центр, Санкт-Петербург*

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЭЛИМИНАЦИИ СРЕДНЕМОЛЕКУЛЯРНЫХ МАРКЕРОВ УРЕМИИ В ПРОЦЕССЕ ГЕМОДИАЛИЗА

Представлены результаты сравнительного исследования кинетики элиминации конечных продуктов гликирования (AGE) и мочевой кислоты в процессе гемодиализа по уровню оптического поглощения оттекающего диализата на длинах волн 285 нм и 365 нм. Измерения проводились с помощью оптико-электронного спектрального сенсора на основе УФ-светодиодов, временные зависимости пропускания были получены для группы из 12 пациентов с терминальной стадией хронической болезни почек, анализ данных осуществлялся в рамках двухпуловой модели.

N.V. ROSHCHINA, G.A. KONOPLEV, O.S. STEPANOVA,
A.I. KUZNETSOV¹, A. FRORIP¹, V. KORSAKOV¹,
G.A. ZEMCHENKOV²

Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"

¹*LDIAMON AS, Tartu, Estonia*

²*Nevsky Nephrology Center, Saint-Petersburg*

OPTOELECTRONIC SYSTEM FOR THE MONITORING OF MIDDLE MOLECULAR WEIGHT UREMIC MARKERS ELIMINATION DURING HEMODIALYSIS

The results of a comparative study of the elimination kinetics of advanced glycation end products (AGE) and uric acid during hemodialysis by the optical absorption of effluent dialysate at the wavelengths of 285 nm and 365 nm are presented. Measurements were carried out using an optoelectronic spectral sensor based on deep UV LEDs, the time profiles of optical transmission were measured for a group of 12 patients with end-stage chronic kidney disease, data analysis was carried out within the framework of the two-pool model.

Гемодиализ является методом внепочечного очищения крови, применяемым для поддержания жизни больных страдающих хронической болезнью почек в терминальной стадии. Отмечается, что изменение концентрации низкомолекулярных уремических маркеров, таких как мочевины, мочевая кислота и креатинин, в крови и оттекающем диализате не всегда в полной мере позволяет оценить эффективность процедуры [1]. В качестве альтернативы было предложено использовать конечные продукты гликирования (AGE) – средномолекулярные вещества, которые накапливаются в организме и приводят к появлению осложнений [2].

Целью настоящей работы является сравнительное исследование кинетики элиминации AGE и мочевой кислоты по уровню оптического поглощения оттекающего диализата.

Полоса поглощения AGE лежит в диапазоне 360...370 нм [2], в то время как для мочевой кислоты она смещена в область 270...290 нм [1]. Исходя из этого был разработан оптико-электронный спектральный сенсор на основе УФ-светодиодов, с помощью которого были измерены временные зависимости пропускания оттекающего диализата в выходной магистрали аппарата «искусственная почка» на длинах волн 285 и 365 нм для более чем 200 сеансов ГД в группе из 12 пациентов.

После пересчёта полученных кривых в поглощение и их нормировки, они были аппроксимированы суммой двух экспонент в соответствии с двухпуловой моделью элиминации уремических токсинов [3]. По результатам аппроксимации были оценены постоянные времени описывающие перенос маркеров из крови в диализат через диализную мембрану и из внутреннего пула организма в кровь соответственно.

При анализе полученных результатов сделаны выводы о том, что кинетика выведения AGE близка к кинетике низкомолекулярных уремических маркеров, что позволяет использовать AGE для проведения онлайн-мониторинга процедуры гемодиализа. При этом следует принимать во внимание, что во время диализа выводится только малая часть продуктов AGE, находящихся в несвязанном с белками состоянии [2], и зависимости концентрации AGE в диализате могут не отражать изменение их общей концентрации в крови.

Список литературы

1. Neiryneck N., et al. An update on uremic toxins // Int. Urol. Nephrol. 2013. V. 45. P. 139-150.
2. Ramsauer B., et al. Comparing changes in plasma and skin autofluorescence in low-flux versus high-flux hemodialysis // Int. J. Artif. Organs. 2015. V. 38(9). P. 488-493.
3. Burgelman M., et al. Estimation of parameters in a two-pool urea kinetic model for hemodialysis // Medical Engineering & Physics. 1997. V. 19. Is. 1. P. 69-76.

Е.А. БАСКО¹, В.И. МАКАРОВ^{1,2}, М.С. КАШТАНОВА³,
Н.С. МОРОЗОВА³, В.Б. ЛОЩЕНОВ^{1,2}

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

³Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова

ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ОКСИГЕНАЦИИ ГЕМОГЛОБИНА И УРОВНЯ КРОВЕНАПОЛНЕННОСТИ В ТКАНЯХ ПАРОДОНТА

В работе приведены результаты оценки эффективности терапевтического лечения больных с пародонтозом по спектрам обратного диффузного отражения слизистых тканей. Одним из преимуществ данного метода является возможность неинвазивной диагностики состояния тканей в режиме реального времени. Анализ полученных спектров позволяет определять степень оксигенации гемоглобина в микроциркуляторном русле тканей и уровень их кровенаполненности.

E.A. BASKO¹, V.I. MAKAROV^{1,2}, M.S. KASHTANOVA³,
N.S. MOROZOVA³, V.B. LOSCHENOV^{1,2}

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

²Prokhorov General Physics Institute of the RAS, Moscow

³First Sechenov Moscow State Medical University

SPECTRAL ESTIMATION OF THE LEVEL OF OXYGENATION AND BLOOD FILLING IN PERIODONTAL TISSUES

Estimation of patient treatment efficiency with parodontosis is presented. The main advantage of the method based on backward diffuse reflection spectroscopy is a possibility to provide real-time noninvasive biotissue diagnosis. Obtained spectra analysis allows to evaluate level of hemoglobin oxygenation and blood filling in microcirculatory bloodstream of gingiva.

Одной из главных проблем в современной стоматологии является определение эффективности лечения при заболеваниях пародонта. Наиболее важными критериями для определения, насколько успешно была проведена терапия, являются количество кислорода в слизистой ткани и её кровенаполненность. Решить данную проблему можно с помощью спектроскопии обратного диффузного отражения. Целью данной работы являлась оценка уровня оксигенации гемоглобина в тканях пародонта на основе спектров диффузного отражения.

В данном исследовании проводилась фотодинамическая терапия (ФДТ) детям с ДЦП, страдающих от пародонтоза. В связи с особенностями

заболевания у пациентов наблюдается низкий уровень гемоглобина и кислорода в тканях пародонта. Применение ФДТ с красителем метиленовым синим способно улучшить эти показатели.

Для количественного определения степени оксигенации и относительного количества гемоглобина в ткани использовался логарифм спектра обратного отражения. Затем экспериментально полученные кривые были аппроксимированы функцией, учитывающей вклад рассеяния и поглощения тканью независимо от гемоглобина. Расчёт концентрации оксигенированного и деоксигенированного гемоглобина осуществлялся путем минимизации разности между модельными и экспериментальными спектрами в диапазоне 500 - 600 нм, так как в этом диапазоне формы спектров окси- и деоксигенированного гемоглобина различаются наиболее сильно (рис. 1) [1].

В исследовании участвовало 6 пациентов. Для ФДТ-воздействия использовалось лазерное излучение с длиной волны 660 нм, плотностью мощности 100 – 200 мВт/см². Оценка степени оксигенации и уровня кровенаполненности проводилась до ФДТ и через 12 дней после ФДТ.

Величина насыщения гемоглобина кислородом вычислялась как отношение концентрации деоксигенированного гемоглобина к сумме концентраций окси- и деоксигенированного гемоглобина [2].

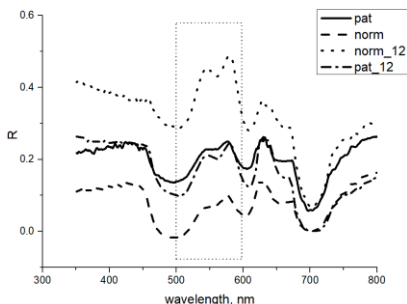


Рис. 1. Спектры диффузного отражения пародонта одного пациента для воспалённой (pat) и здоровой (norm) областей, снятые до ФДТ и через 12 дней после ФДТ

В результате проведённой терапии через 12 дней степень оксигенации гемоглобина в микроциркуляторном русле тканей пародонта увеличивалась на 15 - 20 %, достигая значений 75 - 80 %, что соответствует показателям здорового пародонта.

Список литературы

1. Strattonnikov A.A., Ermishova N.V., Loshchenov V.B. // Kvantovaya Elektronika. 2002. V. 32 (10). P. 917-922.
2. Ryabova A.V., Strattonnikov A.A., Loshchenov V.B. // Kvantovaya Elektronika. 2006. V. 36(6). P. 562-568.

Н.И. НЕЧИПУРЕНКО¹, Т.А. ПРОКОПЕНКО¹,
И.Д. ПАШКОВСКАЯ¹, А.П. ЗАЖОГИН, М.П. ПАТАПОВИЧ

*Белорусский государственный университет, Минск
¹РНПЦ неврологии и нейрохирургии, Минск, Беларусь*

ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОЛОГИИ И ЛАЭМС ВЫСОХШИХ КАПЕЛЬ ПЛАЗМЫ КРОВИ В ДИАГНОСТИКЕ ПАЦИЕНТОВ С ДЭ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Изучена морфология образцов высохшей плазмы крови больных с дисциркуляторной энцефалопатией (ДЭ) головного мозга. Выявлены структурные особенности высохших капель плазмы крови пациентов с диагнозом ДЭ мозга различной степени до и после внутривенно лазерного облучения крови. Получены полуколичественные результаты пространственного распределения кальция в слоях высохшей капли с использованием метода лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии для получения дополнительной информации при постановке и уточнению диагноза.

N.I. NECHIPURENKO¹, T.A. PROKOPENKO¹,
I.D. PASHKOVSKAYA¹, A.P. ZAJOGIN, M.P. PATAPOVICH

*Belarusian State University, Minsk
¹RRPC of Neurology and Neurosurgery, Minsk, Belarus*

APPLICATION OF MORPHOLOGY AND LAEMS OF DRIED BLOOD PLASMA DROPS IN THE DIAGNOSIS OF PATIENTS WITH DE OF THE BRAIN

The morphology of dried blood plasma samples from patients with dyscirculatory encephalopathy (DE) of the brain was studied. The structural features of dried blood plasma drops in patients diagnosed with various degrees of brain DE before and after intravenous laser irradiation of blood were revealed. Semi-quantitative results of the spatial distribution of calcium in the layers of a dried drop were obtained using the method of laser atomic emission spectrometry to obtain additional information when making and clarifying the diagnosis.

Одним из методов коррекции нарушений, возникающих при ишемии головного мозга, может быть лазерная гемотерапия, в частности внутривенное лазерное облучение крови (ВЛОК) в красной области спектра. Результатом действия лазерной гемотерапии, является ответ системы регулирования гомеостаза на развитие патологических процессов

в отдельных органах и тканях, поэтому изучение действия низкоинтенсивного лазерного излучения на кровь при цереброваскулярных заболеваниях актуально.

При различных вариантах нарушения мозгового кровообращения, в частности ДЭ, высохшая капля биологической жидкости имеет отличную от здорового человека структуру. Нами изучена морфология высохших капель плазмы крови более 30 пациентов с ДЭ головного мозга различной степени и характером патологии. В качестве примера на рис. 1а приведена морфология центральной части высохшей через 90 минут капли плазмы крови пациента с ДЭ ГМ до (а) и после (б) ВЛОК.

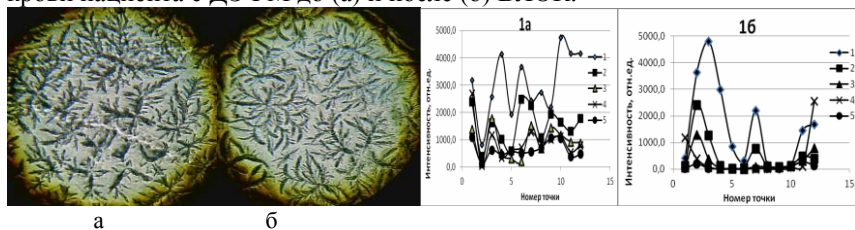


Рис. 1. Снимки центральной части высохших капель плазмы крови пациентов, интенсивность линии Ca II (393, 239 нм) в атомно-эмиссионных спектрах фаций плазмы крови пациентов (в точках и слоях)

У пациента аномальное структурирование белка в значительной мере происходит в верхних слоях высыхающей капли плазмы крови. При этом на поверхности фации вытесняется NaCl, который кристаллизуясь, создает дендритную, похожую на листья, картину.

Для конкретизации патологии обследованных больных дополнительная информация получена при определении кальция с использованием метода лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС – спектрометр LSS-1).

Полученные данные показывают, что у больных с ДЭ в процессе высыхания капель плазмы происходит хаотичное образование центров коагуляции, наблюдается разброс концентрации кальция как по поверхности, так и слоям. Налицо изменение связывающей способности альбумина при патологии. Это приводит к аномальной коагуляции белка и увеличению концентрации кальция по центру фации и в более глубоких слоях, что нехарактерно для здорового человека. После проведения 8 - 10 сеансов ВЛОК у пациента наблюдаются определённые улучшения свойств белков плазмы крови – максимальное распределение кальция передвигается на периферию капли, что ближе к качеству белков здорового человека.

Г.С. РОГОЖНИКОВ, Т.Е. ЛЮБЫНСКАЯ

РФЯЦ - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл.

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ИНВАЗИВНОЙ МАЛОТРАВМАТИЧНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ БИОПСИИ

Сообщается о промежуточных результатах разработки комплекса оптической биопсии для высокоинформативной диагностики онкологических заболеваний. Работа комплекса основана на сравнительном анализе спектральных данных, полученных при тестировании здоровых и поражённых тканей при помощи малотравматичного инвазивного оптического зонда.

G.S. ROGOZHNIKOV, T.E. LYUBYSKAYA

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region

DEVELOPMENT OF INVASIVE LOW-TRAUMATIC OPTICAL BIOPSY COMPLEX

Intermediate results on development of optical biopsy complex for high-quality diagnostics of oncological diseases have been reported. Complex functionality is based on the comprehension analysis of spectral data obtained during the tests of healthy and damaged tissues by means of low-traumatic invasive optical probe.

Оптическая биопсия тканей и органов человеческого тела на данный момент является наиболее перспективным способом прецизионной неинвазивной или инвазивной малотравматичной диагностики различных заболеваний [1]. В основе оптической биопсии лежит обработка спектральных данных, полученных при облучении живых клеток узкополосным или широкополосным электромагнитным излучением оптического диапазона, не оказывающим влияние на их функциональность и жизненный цикл. Поражённые или переродившиеся клетки рассеивают свет иначе, чем здоровые клетки, что обусловлено природой и состоянием присутствующих в них микро- и макроэлементов, и это позволяет дифференцировать их путем сравнительного анализа спектральных данных.

Наиболее эффективными считаются способы [2 - 4], позволяющие проводить малотравматичную инвазивную биопсию при помощи тонкой иглы, внутри которой размещены оптоволокна, излучающие и

собирающие рассеянное тканями излучение. При этом источником излучения может быть как широкополосный излучатель [2, 3], так и набор узкополосных (линейчатых) излучателей [4], центральные длины волн которых совпадают с пиками поглощения определённых молекулярных соединений, таких как вода, жир, оксигенированный и дезоксигенированный гемоглобин. Преимуществом таких способов является высокая точность определения границ повреждённого или перерождённого участка ткани и его структуры.

Разрабатываемый комплекс оптической биопсии также использует в своей работе малотравматичные инвазивные зонды с иглой наружного диаметра всего 800 нм. Игла закреплена на рукоятке, в которой расположены прецизионные датчики контроля положения иглы в биологической ткани и давления, прикладываемого к рукоятке оператором комплекса. Ядром системы стало оптоэлектронное устройство, обеспечивающее генерацию непрерывного сверхширокополосного (по сравнению с существующими аналогами) излучения регулируемой мощности в диапазоне 400 - 2000 нм, подаваемого в зонд, а также высокочастотную регистрацию, обработку и анализ спектральных данных в режиме реального времени.

С целью повышения информативности диагностики начата разработка инвазивного зонда в формате, позволяющем сочетать оптическую и традиционную биопсию, что обусловлено интересом медицинских учреждений к такой постановке клинических исследований [5 - 9].

Список литературы

1. Турчин И.В. // УФН. 2016. Т. 186. № 5. С. 550-567.
2. Belkov S.A., Kochemasov G.G., Lyubynskaya T.E., et al. // Appl.Phys.B. 2011. V. 105. P. 641-648.
3. Коржов А.Г., Нужный А.С., Степанов Р.В., Шумский С.А. // Альманах клинической медицины. 2008. С. 65-68.
4. Bogomolov A., Zabarylo U., Kirsanov D., et al. // Sensors. 2017. V. 17. P. 1914.
5. Spliethoff J.W., Evers D.J., Jaspers J.E., et al. // Transl. Oncology. 2014. V. 7. No. 2. P. 230-239.
6. Desjardins A.E., Hendriks B.H., Voort M.v.d., et al. // Biomed. Opt. Express. 2011. V. 2. No. 6. P. 1452-1461.
7. Ifitimia N., Park J., Maguluri G., et al. // Biomed. Opt. Express. 2018. V. 9. No. 2. P. 694-704.
8. Ifitimia N., Bouma B., Pitman M., et al. // Rev. of Sci. Instr. 2005. V. 76. P. 064301.
9. Dremin V., Potapova E., Zherebtsov E., et al. // Nature Sci. Reports. 2020. V. 10. P. 14200.

Д.А. ПОЛЕТАЕВ, Б.В. СОКОЛЕНКО

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

О ВОЗМОЖНОЙ ФОТОАКТИВАЦИИ ВИРИОНОВ КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИИ

Представлена выдвинутая гипотеза о возможной фотоактивации вирионов коронавирусной инфекции ультрафиолетовым излучением. Проводится теоретическое обоснование предложенной гипотезы и её проверка по открытым статистическим данным.

D.A. POLETAEV, B.V. SOKOLENKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

POSSIBILITY OF COVID-19 VIRIONS' FOTOACTIVATION

In this paper a hypothesis of covid-19 virions' fotoactivation was proposed. Also the results of it justification and verification by open statistical data were presented.

Коронавирусная инфекция (COVID-19) является острым респираторным заболеванием, вызываемая коронавирусом SARS-CoV-2 [1]. На её распространение по территориям стран влияют множество факторов, таких как плотность населения, миграционные особенности, климатические условия и другие [2]. Однако в ряде случаев для примерно одинаковых по указанным (или приведённым) параметрам стран распространение COVID-19 может сильно отличаться.

Фотоактивация – усиление химической активности молекул под действием излучения [3]. Механизмы фотоактивации в общем виде могут быть описаны генерацией активных форм кислорода и освобождению водородных связей, что в комплексе усиливает химическую реакционную способность соединения [3].

Целью работы является теоретическое обоснование выдвинутой гипотезы и её проверка по открытым статистическим данным.

Вирион COVID-19 состоит из сферической частицы, диаметром 60 - 140 нм, окружённой булавовидными отростками, длина которых варьируется от 9 до 12 нм [1]. Сферическая частица вириона состоит, в основном, из белка. Такую частицу можно считать диэлектрическим резонатором. В [4] приведены формулы для приближённого расчёта собственной частоты диэлектрического резонатора. На рис. 1 представлены графики зависимости резонансной длины волны

сферического резонатора для низших типов колебаний (H101 и E101) в зависимости от диаметра сферы для значения относительной диэлектрической проницаемости 10 (среднее значение относительной диэлектрической проницаемости ДНК). Из графиков на рис. 1 видно, что резонансная длина волны приходится на ультрафиолетовый диапазон. Ультрафиолетовое излучение, как показано в [5] не всегда приводит к денатурированию белка и разрушению цепочек ДНК. При малых интенсивностях данное воздействие может оказывать фотоактивирующий эффект. Ультрафиолетовое излучение естественно сопровождается видимым излучением. Однако при наличии озоновых дыр, интенсивность ультрафиолетового излучения резко повышается. По накопленным открытым статистическим данным можно проследить зависимость роста числа новых случаев заражения COVID-19 на территории определённой страны от распределения озоновых дыр с учётом временного сдвига инкубационного периода в 14 дней [1]. Эти данные представлены на диаграмме (рис. 2), которая отображает сводные данные по росту числа заболевших COVID-19 в Великобритании и среднему значению толщины озонового слоя над данной страной в единицах Добсона [6, 7]. Выбор данной страны обусловлен минимальным действием миграционного фактора. Из рис. 2 заметна корреляция между появлением озоновых дыр и ростом числа новых случаев заражения. Также можно проследить зависимость между активностью солнечных вспышек, излучающих в более коротковолновом (чем ультрафиолетовый) диапазоне, и производящими активацию отростков вириона.

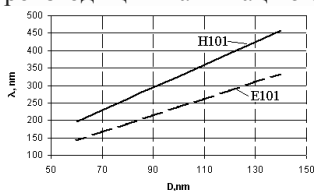


Рис. 1. Зависимость резонансной длины волны от диаметра сферы

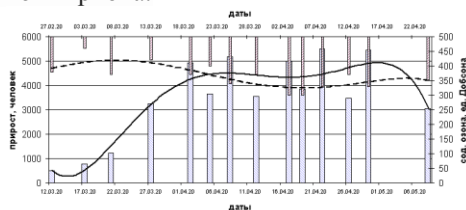


Рис. 2. Корреляция между толщиной озонового слоя и количеством новых случаев заражения

Список литературы

1. Qamar M., et al. // Journal of Pharmaceutical Analysis. 2020. V. 10 (4). P. 313-319.
2. Xu X., et al. // Sci. China Life Sci. 2020. V. 63. P. 457-460.
3. Grishkanich A. et al. // Proc. SPIE. 2016. P. 97090U.
4. Ilchenko M.E., et al. // Radio and communications. 1989.
5. Gates F.L. // The Journal of General Physiology. 1929. V. 13 (2). P. 231-248.
6. Данные <https://datalens.yandex/> (дата обращения 01.12.2020).
7. Данные <http://www.cao-rhms.ru/oisa/archive.htm> (дата обращения 01.12.2020).

А.Э. АКМАЛОВ, Г.Е. КОТКОВСКИЙ, Ю.А. КУЗИЩИН,
И.Л. МАРТЫНОВ, Е.В. ОСИПОВ, А.А. ЧИСТЯКОВ,
А.П. ТКАЧУК¹, Б.И. ВЕРДИЕВ¹, А.Г. АЛАТЫРЕВ¹

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

*¹Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии
им. Н.Ф. Гамалеи, Москва*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМА СЧЁТА ФОТОНОВ В ПРОТОЧНОМ ОПТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ АНАЛИЗА БИОАЭРОЗОЛЕЙ

Представлены результаты проектирования и экспериментального исследования системы регистрации сигналов рассеяния и люминесценции биоаэрозолей на базе фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), работающих в режиме счёта фотонов. Обсуждаются шумовые характеристики системы регистрации, оптимальный режим работы проточной камеры и предел обнаружения аэрозольных частиц.

A.E. AKMALOV, G.E. KOTKOVSKII, Yu.A. KUZISHCHIN,
I.L. MARTYNOV, E.V. OSIPOV, A.A. CHISTYAKOV,
A.P. TKACHUK¹, B.I. VERDIEV¹, A.G. ALATYREV¹

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

*¹National Research Center for Epidemiology and Microbiology
named after the honorary academician N.F. Gamaleya, Moscow*

APPLICATION OF THE PHOTON COUNTING MODE IN REAL-TIME FLOW CYTOMETRY OF BIOAEROSOLS IN AIR

The results of the design and experimental study of a system for recording scattering and luminescence signals of bioaerosols based on photomultiplier tubes (PMTs) operating in the photon counting mode are presented. The noise characteristics of the registration system, the optimal operating mode of the flow chamber, and the detection limit of aerosol particles are discussed.

Проточный оптический метод (ПОМ) анализа аэрозольных частиц [1 - 3] представляет собой мощный инструмент для обнаружения биопатогенов различной природы. Работа приборов на базе данной технологии основана на поштучной регистрации и классификации аэрозольных частиц путем анализа сигналов флуоресценции и рассеяния УФ-излучения. Современный прогресс в области фотодетекторов и

микропроцессорной техники позволяет реализовать в компактном исполнении высокочувствительную и производительную систему регистрации и обработки оптических сигналов, в режиме счёта фотонов.

В рамках настоящей работы была спроектирована и реализована четырёхканальная системы регистрации оптических сигналов на базе модулей ФЭУ производства ET Enterprises и микроконтроллера STM32, предназначенная для работы в спектральной диапазоне 270 - 600 нм. Максимальная частота регистрации событий составила 200 кГц, при пороге обнаружения на уровне 2 - 3 отсчётов / событие (40 - 60 фотонов / событие).

Спроектированная система была смонтирована на проточной оптической камере и исследована на предмет возможности регистрации флуоресценции модельных биоаэрозолей. По результатам исследований и анализа шумовых характеристики был оптимизирован режим работы проточной камеры и системы регистрации. Итоговая чувствительность реализованной системы позволяла регистрировать наличие в анализируемой пробе биоаэрозольных частиц размером от 1 мкм, при средней интенсивности возбуждающего УФ-излучения с длиной волны 280 нм на уровне 1 - 5 Вт/см² и времени накопления сигнала не более 25 мкс.

Список литературы

1. Hill S.C., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. Elsevier. 2015. V. 157. P. 54-70.
2. Bundke U., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2010. V. 3, № 1. P. 263-271.
3. Khudyakov E.S., et al. // Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt. 2016. P. 30-38.

М.В. ВАНЮШИН, П.А. НОСОВ, П.В. ЗИНИН¹

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва*

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ БИОЛОГИЧЕСКИХ МИКРООБЪЕКТОВ

Рассмотрено математическое моделирование упругих свойств биологических микрообъектов, таких как клетки и вирусы. Моделирование позволяет найти характерные частоты колебаний микрообъектов и частоты резонанса при воздействии акустической волны.

M.V. VANYUSHIN, P.A. NOSOV, P.V. ZININ¹

*Bauman Moscow State Technical University
¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow*

DEFINITION OF THE RESONANCE FREQUENCIES OF BIOLOGICAL MICRO-OBJECTS THROUGH MODELING OF ELASTIC PROPERTIES

Mathematical modeling of elastic properties of biological micro-objects, such as cells and viruses, is considered in order to find the characteristic vibration frequencies of objects and the frequency of resonance when an acoustic wave propagates in the external environment.

Облучение биологических микрообъектов позволяет проводить анализ их структуры и характеристик, а при определённых условиях и разрушение. Одним из таких условий является воздействие излучением, приводящее к резонансу колебаний микрообъекта. В свою очередь, это позволяет разработать подходы к подавлению микроорганизмов, доставке сильнодействующих лекарств в организме человека без побочного вреда и решению других задач [1].

В данной работе представлено получение математической модели микрообъекта сферической формы с тонкой оболочкой, находящегося в жидкости. Внутренняя жидкость характеризуется плотностью ρ , скоростью звука в среде c , объёмной вязкостью ξ и сдвиговой вязкостью η . Оболочка описывается с помощью постоянной натяжения T_0 , модуля сжатия площади K_A , а также модулем μ , характеризующем сопротивление деформации сдвига. Целью моделирования является нахождение характерных частот колебания клетки [2].

Поле скоростей в жидкости можно представить, как суперпозицию вихревого поля A и скалярного поля Φ :

$$V = -grad\Phi + rotA$$

Решения для Φ^I и Φ^O представляются в виде расходящихся и стоячих сферических волн, для A^I как сдвиговая волна, для A^O как вязкая волна.

Введем сферическую систему координат r, θ, φ с началом координат в центре клетки. В силу симметрии будем рассматривать только колебания вдоль оси. Тогда вектор скорости V :

$$V_r = -\frac{\partial\Phi}{\partial r} + \frac{1}{r}\nabla_{\theta}A, \quad V_{\theta} = -\frac{1}{r}\frac{\partial\Phi}{\partial r} - \frac{1}{r}\frac{\partial(rA)}{\partial r}, \quad \nabla_{\theta}A = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(A\sin\theta).$$

Дисперсионное уравнение выводится как определитель системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которую можно получить из граничного условия тензоров напряжения:

$$\sigma_{rr}^O - \sigma_{rr}^I + \frac{T_0}{a^2}\left(2W_r + \Delta_{\theta}\frac{\partial W_r}{\partial\theta}\right) - \frac{2K_A}{a^2}(2W_r + \Delta_{\theta}W_{\theta}) = 0,$$

$$\sigma_{\theta r}^O - \sigma_{\theta r}^I + \frac{K_A}{a^2}\frac{\partial}{\partial\theta}(2W_r + \Delta_{\theta}W_{\theta}) + \frac{\mu_a}{a^2}\left(2W_{\theta} + \frac{\partial}{\partial\theta}\Delta_{\theta}W_{\theta}\right) = 0,$$

$$\Delta_{\theta}W = \frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta W_{\theta}),$$

где W – относительное движение оболочки, K_A – модуль сжатия площади, T_0 – постоянная напряжения, a – размер клетки (вируса), $\sigma_{\theta r}^O, \sigma_{rr}^O, \sigma_{\theta r}^I, \sigma_{rr}^I$ – компоненты тензора вязких напряжений, обусловленных воздействием наружной жидкости и внутренних изгибных напряжений; а также равенства скоростей на оболочке:

$$V^I|_{r=a} = V^O|_{r=a} = \frac{\partial W}{\partial t},$$

где t – время.

Корнями полученного дисперсионного уравнения будут частоты резонанса клетки, нахождение которых является целью работы.

Список литературы

1. Руденко О.В. Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения // Успехи физических наук. 2007. Т. 177. № 4. С. 374-383.
2. Allegra J.R., Hawley S.A. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments // The Journal of the Acoustical Society of America. 1972. Т. 51. No. 5B. P. 1545-1564.

Н.С. СОСНОВА, А.В. ВАСИЛЬЕВА, В.А. ПАРФЕНОВ
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПИГМЕНТОВ РУССКИХ ИКОН XVI – XIX ВЕКОВ

В работе проведены измерения рентген-флуоресцентных спектров пигментов русских икон XVI–XIX веков. Полученные данные об элементном составе пигментов позволили выполнить их идентификацию. Результаты проведённых исследований будут использованы для создания базы данных по РФА-спектрам пигментов, из которых изготавливали краски русские мастера-иконописцы определённых школ и временных периодов.

N.S. SOSNOVA, A.V. VASILIEVA, V.A. PARFENOV
Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"

X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY FOR DETERMINING THE CHEMICAL COMPOSITION OF PIGMENTS FROM THE XVI - XIX CENTURE RUSSIAN ICONS

The work carried out measurements of X-ray fluorescence spectra of pigments from Russian icons of the 16th - 19th centuries. The data obtained on the elemental composition of pigments made it possible to carry out their identification. The results of the research will be used to create a database on the XRF spectra of pigments, which were made by Russian icon painters of certain schools and time periods.

Неразрушающие оптико-электронные методы диагностики сегодня активно развиваются и совершенствуются за рубежом, так как они являются неинвазивными и снимают ряд ограничений, связанных с необходимостью пробоподготовки. Один из таких методов – рентген-флуоресцентный анализ (РФА), основанный на детектировании излучения флуоресценции атомов неорганических веществ, которое возникает в результате воздействия на вещество рентгеновского излучения. С его помощью получают РФА-спектры, которые показывают элементный состав различных веществ, в том числе красочных пигментов. Использование данного метода для диагностики пигментов старинных икон значительно упростит процедуру их реставрации и поспособствует развитию научной реставрации в нашей стране.

В данной работе для измерения РФА-спектров использовался спектрометр NitonXL3tGold+. Измерения (рис. 1) проводились согласно диаграмме контрольных точек, которые соответствуют основным цветам красок на этой иконе и были выбраны реставраторами. Пример полученного после измерений спектра представлен на рис. 1в. Он снят в контрольной точке 1 и по элементному составу более всего соответствует пигменту ярь – медянка (уксуснокислая медь). Спектр также показал значительный пик свинца, что можно объяснить тем, что данный пигмент был использован в смеси со свинцовыми белилами, благодаря чему краска приобрела тёмно-зелёный, а иногда бирюзовый оттенок [1].

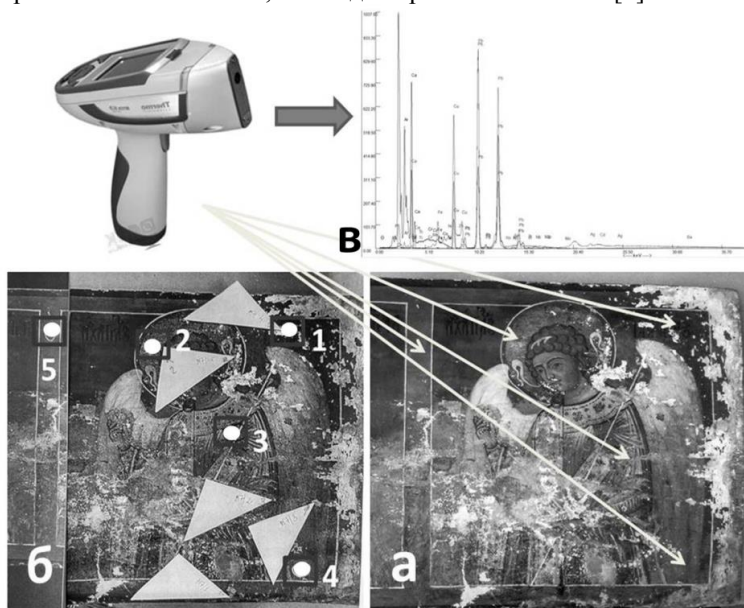


Рис. 1. Измерения: оригинал иконы (а), контрольные точки (б), РФА–спектры (в)

В ходе дальнейших исследований планируется систематизировать полученную информацию и создать базу данных по РФА-спектрам пигментов отдельных русских иконописных школ разных временных периодов. Такая информация необходима для корректной реставрации памятников истории, поскольку в процессе выполнения реставрационных работ необходимо использовать аутентичные материалы.

Список литературы

1. Филатов В.В. Реставрация настенной масляной живописи. М.: Изобр. искусство, 1995.

А.С. ПЕРИН, В.Е. БОДРЕНИН, А.В. ЩУКИН

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 850 нм
В КАНАЛЬНОМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ
НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ**

В работе приведены результаты исследования затухания оптического излучения с длиной волны 850 нм в канальном волноводе, сформированном в кристалле ниобата лития методом оптического индуцирования с учётом вклада пироэлектрического и фоторефрактивного эффектов.

A.S. PERIN, V.E. BODRENIN, A.V. SHCHUKIN

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics

**STUDY OF ATTENUATION OF OPTICAL RADIATION
WITH A WAVELENGTH OF 850 nm IN A CHANNEL OPTICAL
WAVEGUIDE BASED ON LITHIUM NIOBATE**

The paper presents the results of studying the attenuation of optical radiation with a wavelength of 850 nm in a channel waveguide formed in a lithium niobate crystal by the optical induction method, taking into account the contribution of pyroelectric and photorefractive effects.

Сегнетоэлектрический кристалл ниобат лития является одним из наиболее распространённых материалов для изготовления на его основе оптических волноводов, которые в свою очередь, являются базовыми элементами современных фотонных интегрально-оптических схем. Существуют различные способы формирования волноводно-оптических структур в этом кристалле, но многие из них отличаются сложной технической методикой. Одним из простых с точки зрения реализации является метод оптического индуцирования. Суть метода заключается в том, что формирование волноводных структур происходит путем модуляции показателя преломления кристалла при управляемом вкладе фоторефрактивного и пироэлектрического эффектов [1].

Целью данной работы являлось исследование затухания оптического излучения инфракрасного диапазона в канальном волноводе, сформированном в кристалле ниобата лития методом оптического индуцирования.

В экспериментах исследовался каналный волновод, сформированный в нелегированном кристалле ниобата лития лазерным пучком с длиной волны 532 нм и диаметром 10 мкм (рис. 1а-г). Источником излучения при считывании сформированной структуры являлся лазерный диод с длиной волны 850 нм. Мощность лазерного излучения регистрировалась с помощью измерителя оптической мощности Thermal Power Sensors PM100D. Ввод излучения в волновод осуществлялся с помощью одномодового оптического волокна с конусообразным наконечником LEN-T-1-Y(47/56-90-SMF28).

На рис. 1д приведён результат эксперимента по считыванию. Мощность вводимого в волновод излучения составляла 5 мВт.

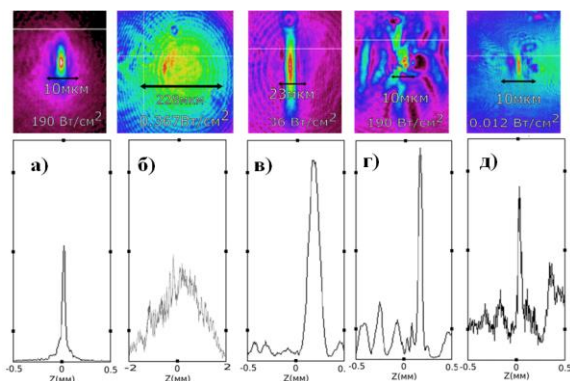


Рис. 1. Картины распределения интенсивности (верхний ряд) и соответствующие им профили (нижний ряд) в процессе формирования волновода (а-г) и считывания в однородную область кристалла (д)

Таким образом, в данной работе было исследовано затухание оптического излучения с длиной волны 850 нм в каналном волноводе, сформированном в кристалле ниобата лития методом оптического индуцирования. Экспериментально показано, что при засветке сформированной волноводной структуры длиной 0,7 мм инфракрасным излучением потери мощности составляют 1,5 дБм/см.

Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Импульс» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по соглашению 075-15-2019-1644, идентификатор проекта RFMEFI62119X0029.

Список литературы

1. Shandarov V., Ryabchenok V., Perin A. // Physics Procedia. 2015. V. 70. P. 754-757.

В.В. ГАЛУЦКИЙ, И.Г. ПОНЕТАЕВА, К.В. ПУЗАНОВСКИЙ,
Е.В. СТРОГАНОВА

Кубанский государственный университет, Краснодар

СПЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЕРАМИКИ LiNbO₃:Er НА ПОДЛОЖКАХ LiNbO₃

В работе продемонстрированы спектрально-кинетические свойства керамики LiNbO₃:Er нанесённой на ориентированные подложки LiNbO₃, LiNbO₃:Yb, LiNbO₃:Yb,Er.

V.V. GALUTSKIY, I.G. PONETAEVA, K.V. PUZANOVSKIY,
E.V. STROGANOVA

Kuban State University, Krasnodar

SPECTROKINETIC STUDIES OF LiNbO₃: Er CERAMICS ON LiNbO₃ SUBSTRATES

This work demonstrates the spectral and kinetic properties of LiNbO₃:Er ceramics deposited on oriented substrates LiNbO₃, LiNbO₃: Yb, LiNbO₃: Yb, Er.

Актуальность предлагаемых исследований определяется востребованностью современных энергоэффективных покрытий для преобразования энергии. Цель проведённых исследований – совершенствование общего подхода создания новых функциональных материалов, с градиентным распределением оптических свойств (лазерных, нелинейно-оптических) с целью повышения эффективности уже функционирующих устройств и создания принципиально новых материалов, и компонентов. В разрабатываемых устройствах обратная связь будет определяться повышением энергоэффективности процесса усиления и генерации. Основной акцент в исследованиях делается на параметры эффективности энергообмена в системе диод-люминофор. Обратная связь имеет категорию распределённого типа, реализующуюся за счёт наличия градиента концентрации локальных оптических центров. Рассматриваемый подход к повышению энергоэффективности устройств и процессов энергообмена схож с процессами, реализованными в объектах с микро и наноструктурированием.

Для достижения заявленной цели методом лазерной абляции с поверхности мишени из ниобата лития с повышенной до 10 ÷ 20 мол. %

концентрацией ионов Er^{3+} производилось напыление на ориентированную подложку из ниобата лития без оптических примесей (рис. 1), подложку ниобата лития, активированную ионами Er^{3+} и подложку ниобата лития, активированную ионами Yb^{3+} и Er^{3+} . Скорость напыления и качество керамической поверхности оценивалась с помощью электронной микроскопии. Для проведения оптических измерений и оценки эффективности излучательных свойств нанесённого керамического покрытия применялись спектрокинетические исследования (рис. 2) [1].

На рис. 2 показана спектрально-кинетическая зависимость интенсивностей излучения при накачке на длине волны 970 нм для керамического покрытия $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ нанесённого на кристаллическую подложку $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$. Применяя поляризационные измерения по виду спектрокинетик, оценивалась степень однородности ориентации оптических центров и их кристаллического окружения, влияния их на эффективность излучательного релаксационного канала.

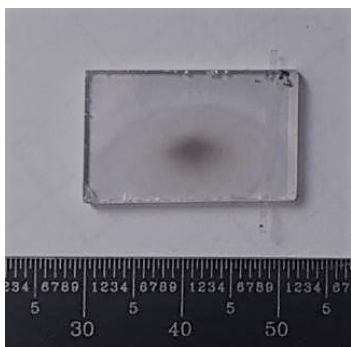


Рис. 1. Вид керамики $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ на подложке

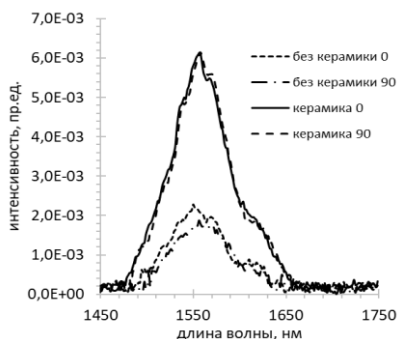


Рис. 2. Спектрокинетика керамики $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ на подложку $\text{LiNbO}_3:\text{Yb,Er}$

Работа выполнена при поддержке грантов КНФ № МФИ-20.1-35/20 и РФФИ № 19-42-230006 р_а.

Список литературы

1. Babenko I.D., Galutskiy V.V., Ivashko S.S., Stroganova E.V. // Optical Materials. 2020. V. 102. P. 109818.

С.М. КОСТРИЦКИЙ, Ю.Н. КОРКИШКО, В.А. ФЕДОРОВ,
О.Г. СЕВОСТЬЯНОВ¹, И.М. ЧИРКОВА¹

НПК «Оптолинк», Зеленоград

¹Кемеровский государственный университет

ЗАВИСИМОСТЬ СВОЙСТВ ПРОТОННО-ОБМЕННЫХ ВОЛНОВОДОВ ОТ СТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КРИСТАЛЛОВ LiNbO_3

Установлено, что спектральные характеристики, фазовый состав и электрооптические свойства волноводов зависят от небольших вариаций стехиометрического состава пластин ниобата лития, которые используются для изготовления волноводов. Обнаружена пространственная неоднородность этих параметров волноводов, изготовленных на пластинах разного стехиометрического состава. Полученные результаты позволили провести оптимизацию процесса изготовления модуляторов на основе канальных волноводов в кристаллах LiNbO_3 .

S.M. KOSTRITSKII, Yu.N. KORKISHKO, V.A. FEDOROV,
O.G. SEVOSTYANOV¹, I.M. CHIRKOVA¹

RPC Optolink Ltd, Zelenograd

¹Kemerovo State University

DEPENDENCE OF PROPERTIES OF PROTON-EXCHANGED WAVEGUIDES ON STOICHIOMETRIC COMPOSITION OF LiNbO_3 CRYSTALS

The spectroscopic characteristics, phase composition and electro-optic properties of these waveguides have been found to be depending on the small variation of stoichiometry in the near-congruent lithium niobate substrates used for waveguides fabrication. Spatial inhomogeneity of these parameters for waveguides fabricated on substrates with different stoichiometry has been discovered. The results allowed us to optimize the process for fabrication of phase modulators based on channel waveguides in LiNbO_3 crystals.

В настоящее время, наибольшее применение в интегрально-оптических устройствах, использующих электрооптические кристаллы LiNbO_3 , нашли канальные волноводы [1, 2]. Однако, методы ИК-спектроскопии широко используемые для планарных волноводов [3, 4] не позволяют определить фазовый состав канальных оптических волноводов, из-за их малого размера (в нашем случае ширина канала составляла

от 5,6 до 6,8 мкм). При этом предполагалось, что канальный волновод имеет такой же фазовый состав $H_xLi_{1-x}NbO_3$, как и планарный тестовый образец. Однако, в случае узких канальных протонно-обменных (ПО) волноводов, концентрация протонов x меньше, чем в планарных волноводах, и, поэтому, фазовые составы этих волноводов могут различаться [2]. Для решения этой задачи мы использовали спектроскопию комбинационного рассеяния света (КРС), так как спектры КРС различных фаз $H_xLi_{1-x}NbO_3$ существенно различаются [3], а использование конфокального микроскопа в микро-КРС спектрометре даёт высокое пространственное разрешение (≤ 1 мкм), достаточное для детального исследования канальных волноводов и интегрально-оптических схем на их основе.

Для калибровки данных микро-КРС, мы использовали образцы планарных волноводов, фазовый состав и электрооптические (ЭО) свойства которых были определены методами ИК- и УФ-спектроскопии [3, 4]. Это позволило установить чёткие корреляции между параметрами спектров микро-КРС и значениями ЭО коэффициентов r_{13} , что было использовано нами для оптимизации условий изготовления фазовых ЭО модуляторов на основе канальных ПО волноводов в кристаллах $LiNbO_3$. Обнаружена зависимость фазового состава и ЭО свойств волноводов от стехиометрии исходных кристаллов. Был исследован диапазон значений $[Li]/[Nb]$ от 0,936 до 0,950, близкий к конгруэнтному составу [5].

Использование спектроскопии микро-КРС позволяет проведение экспресс анализа ЭО свойств ПО волноводов, так как отпадает необходимость проведения ряда сложных и трудоёмких технологических операций (полировки торцов, оптической стыковки и нанесения электродов) с интегрально-оптическими элементами, что требуется для проведения оптимизации технологии при использовании прямых измерений ЭО эффективности волноводов.

Список литературы

1. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G., Chirkova I.M., Kokanyan E., Aillerie M. // *Ferroelectr. Lett. Sect.* 2020. V. 47. P. 9-15.
2. Kostritskii S.M., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A. // *Proc. SPIE.* 2013. V. 9065. P. 90650E.
3. Kostritskii S.M., Rodnov S.V., Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Sevostyanov O.G. // *Ferroelectrics.* 2012. V. 440. P. 47-56.
4. Kuneva M., Tonchev S. // *Bulgarian Chemical Communications.* 2011. V. 43. P. 276-287.
5. Kokanyan E., Dieguez E. // *J. Optoelectr. & Adv. Materials.* 2000. V. 2. P. 205-214.

О.Ю. ПИКУЛЬ, Н.В. СИДОРОВ¹, Н.А. ТЕПЛЯКОВА¹,
М.Н. ПАЛАТНИКОВ¹

*Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск
¹Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья
им. И.В. Тананаева Кольского научного центра РАН, Апатиты, Мурманская обл.*

ОПТИЧЕСКАЯ ОДНОРОДНОСТЬ КРИСТАЛЛОВ LiNbO₃:B (0.55 - 1.24 МОЛ. %)

Метод лазерной коноскопии с использованием лазерного излучения мощностью 1 и 90 мВт и фотоиндуцированное рассеяние света применены для исследования оптической однородности кристаллов LiNbO₃:B (0.55, 0.69, 0.83, 1.24 мол. %).

O.Yu. PIKOUL, N.V. SIDOROV¹, N.A. TEPLYAKOVA¹,
M.N. PALATNIKOV¹

*Far Eastern State Transport University, Khabarovsk
¹Tananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw
Materials of Kola Science Center of the RAS, Apatity, Murmansk region*

OPTICAL UNIFORMITY OF LiNbO₃:B³⁺ CRYSTALS (0.55 - 1.24 MOL. %)

The methods of laser conoscopy using laser radiation with a power of 1 and 90 mW and photoinduced light scattering were used to study the optical homogeneity of LiNbO₃:B crystals (0.55, 0.69, 0.83, 1.24 mol. %).

В настоящее время актуальны исследования, направленные на оптимизацию структуры и свойств кристалла ниобата лития (LiNbO₃), на создание оптически высокосовершенных монокристаллов.

Исследования образцов LiNbO₃:B (0,55 ÷ 1,24 мол. %) методом фотоиндуцированного рассеяния света (ФИРС) позволили разделить их на две группы. К первой группе относятся кристаллы, легированные катионами В³⁺ (0,69, 1,24 мол. %), картина ФИРС которых практически не меняется со временем. Для этих кристаллов даже при P = 160 мВт (плотность мощности лазерного излучения p = 6.29 Вт/см²) отсутствует фоторефрактивный отклик, не выявляется индикатриса ФИРС, наблюдается только круговое рассеяние на статических дефектах структуры [1].

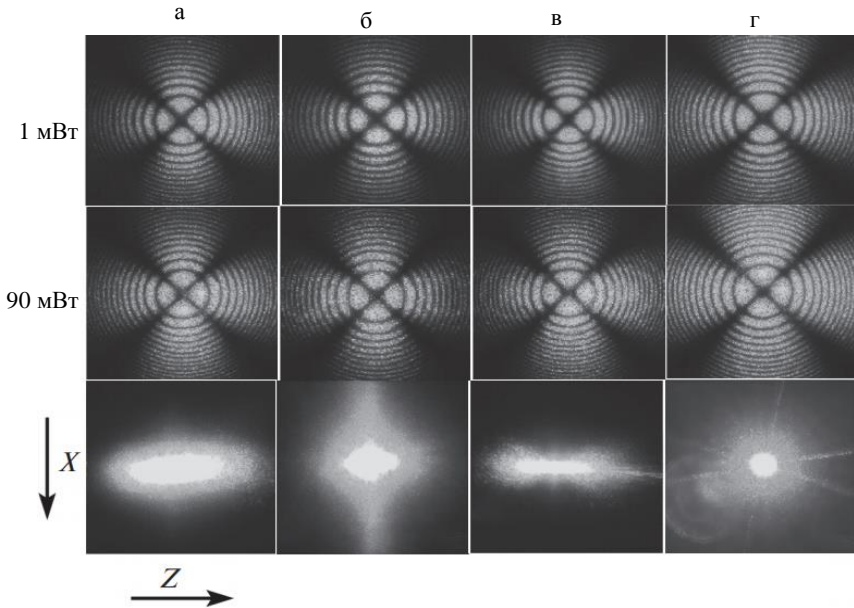


Рис. 1. Коноскопические картины ($P = 1$ и 90 мВт) $\lambda = 532$ нм и спекл-структура индикатрисы ФИРС ($P = 160$ мВт) кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}$: 0,55 (а), 0,69 (б), 0,83 (в), 1,24 мол. % V_2O_5 (г), время полного раскрытия спекл-структуры индикатрисы ФИРС для указанных кристаллов составляет 60 с

Вторая группа – это кристаллы, для которых характерен фоторефрактивный отклик, и наблюдается раскрытие индикатрисы ФИРС с появлением спекл-структуры. Это конгруэнтные кристаллы LiNbO_3 , легированные катионами: V^{3+} (0,55, 0,83 мол. %). Для этих кристаллов наблюдалась трёхслойная спекл-структура картины ФИРС, которая со временем существенно изменялась.

Высокая оптическая однородность кристаллов $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ (0,55 ÷ 1,24 мол. %) подтверждается коноскопическими картинками (см. рис. 1). Только для кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{B}$ (0,83 мол. %) при мощности лазерного излучения 90 мВт (см. рис. 1в) на коноскопических картинах присутствуют незначительные признаки аномальной оптической двуосности [2], связанной, очевидно, с усилением эффекта фоторефракции.

Список литературы

1. Сидоров Н.В. и др. // Журнал технической физики. 2018. Т. 88 (12). С. 1820.
2. Штукенберг А.Г., Пунин Ю.О. Оптические аномалии в кристаллах. СПб.: Наука, 2004.

В.В. ГАЛУЦКИЙ, Е.В. СТРОГАНОВА, С.А. ШМАРГИЛОВ,
П.А. ЯРМАК

Кубанский государственный университет, Краснодар

ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ЛИТИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ PPLN

В работе рассмотрено влияние градиента лития в пластине ниобата лития для PPLN на эффективность ГВГ непрерывного лазера.

V.V. GALUTSKIY, E.V. STROGANOVA, S.A. SHMARGILOV,
P.A. YARMAK

Kuban State University, Krasnodar

INFLUENCE OF LITHIUM GRADIENT ON THE EFFICIENCY OF CONVERSION WITH PPLN

The paper considers the effect of the lithium gradient in a lithium niobate plate for PPLN on the efficiency of SHG of a cw laser.

Использование оптических элементов из ниобата лития, работающих в режиме квазисинхронизма – периодически поляризованного ниобата лития (PPLN) связано с развитием непрерывных лазеров. Существенные ограничения здесь – это фоторефрактивные искажения и температурные ограничения, связанные с формированием термоиндуцированного изменения показателя преломления под воздействием мощного излучения накачки [1]. Одним из способов сгладить эти нежелательные эффекты – это активирование ниобата лития ионами нефоторефрактивных примесей и формирование градиента условий фазового квазисинхронизма. Для экспериментального исследования влияния градиентного квазисинхронизма на эффективность преобразования излучения была реализована схема, в качестве объекта исследования был образец PPLN, изготовленный из кристалла ниобата лития, выращенного вдоль оси X с изменением состава по Li относительно Li^+ и Nb^{5+} от 49,97 до стехиометрического состава на длине 30 мм. Подбор необходимой величины коэрцитивного поля для градиентной пластины осуществлялся с помощью регистрации статической вольтамперной характеристики пластины (рис.1а). Формирование периодической доменной структуры с периодом фазового согласования, соответствующему среднему значению

концентрации Li согласно уравнению Сельмейера, осуществлялось с помощью генератора импульсов и высоковольтного усилителя через нанесённый с помощью комплекса безмасковой фотолитографии «µPG101» фотошаблон. Для измерения эффективности преобразования использовался непрерывный перестраиваемый по мощности лазер ЛАТУС-К. Для детектирования оптического излучения использовался измеритель мощности THORLABS PM 200 с сенсором S370C.

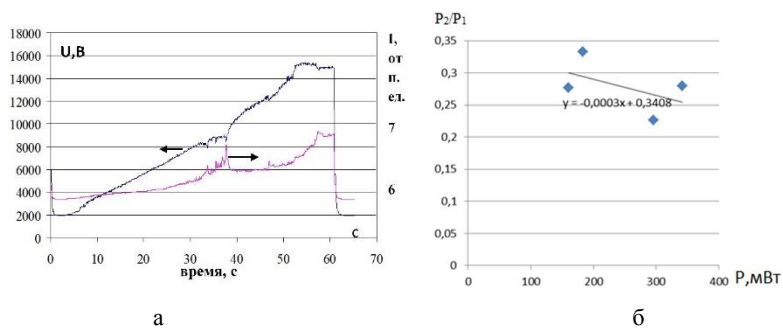


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика градиентной пластины (а) и эффективность ГВГ в градиентном PPLN (б)

Полученный график эффективности преобразования излучения PPLN, изготовленного из градиентной пластины ниобата лития, представлен на рис. 1б. Из анализа зависимости относительной эффективности ГВГ (P_2/P_1) в зависимости от мощности накачки следует, что с увеличением мощности накачки эффективность снижется в пределах 10 %. Снижение обусловлено неблагоприятными факторами, а именно: фоторефрактивным эффектом, и неравномерном локальном разогреве PPLN при увеличении мощности накачки, что в свою очередь, так же отражается на снижении эффективности преобразователя. С другой стороны, при смене ориентации PPLN относительно излучения накачки на спадающий градиент с уровня стехиометрии эффективность преобразования снижалась до значений 0,1–0,2 в указанном диапазоне мощностей накачки из-за перераспределения тепловых источников связанных с поглощением на основной и второй гармонике излучения. Полученные экспериментальные результаты соответствуют модели генерационных процессов в градиентном ниобате лития [1].

Работа выполнена при поддержке госзадания (проект FZEN-2020-022).

Список литературы

1. Galutskiy V.V., Stroganova E.V., Shmargilov S.A., Yakovenko N.A. // Quantum Electronics. 2014. V. 44. P. 30-33.

Ф.С. ПИЛЯК¹, А.Г. КУЛИКОВ¹, В.М. ФРИДКИН¹,
Ю.В. ПИСАРЕВСКИЙ^{1,2}, Н.В. МАРЧЕНКОВ^{1,2},
А.Е. БЛАГОВ^{1,2}, М.В. КОВАЛЬЧУК^{1,2}

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова*

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва*

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЁМНОГО ПЬЕЗОФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В КРИСТАЛЛАХ НИОБАТА ЛИТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОМ

Зарегистрированы изменения кривых дифракционного отражения рентгеновских лучей в кристаллах ниобата лития с примесью железа (LiNbO₃:Fe) при освещении лазером. Отделение вклада деформации, вызванной фотоиндуцированным пьезоэлектрическим эффектом, возникающим в результате объёмного фотовольтаического эффекта, от нагрева проведено по динамике процессов с помощью времязрешающих рентгенодифракционных методик. Зависимость сдвига пика от порядка дифракции подтверждает, что более быстрый процесс является проявлением объёмного пьезофотовольтаического эффекта.

F.S. PILYAK¹, A.G. KULIKOV¹, V.M. FRIDKIN¹,
Yu.V. PISAREVSKY^{1,2}, N.V. MARCHENKOV^{1,2},
A.E. BLAGOV^{1,2}, M.V. KOVALCHUK^{1,2}

¹*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics»
of the RAS, Moscow*

²*National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow*

DISCOVERY AND STUDY OF THE BULK PIEZO-PHOTOVOLTAIC EFFECT IN IRON-DOPED LITHIUM NIOBATE CRYSTALS

Changes in the parameters of X-ray diffraction rocking curves in iron-doped lithium niobate crystals (LiNbO₃:Fe) under laser illumination were registered. The separation of the contribution of deformation caused by the photo induced piezoelectric effect resulting from the bulk photovoltaic effect from heating was implemented according to the dynamics of the processes with use of time-resolved X-ray diffraction techniques. The dependence of the peak shift on the diffraction order confirms the manifestation of the bulk piezo-photovoltaic effect.

Стрейнтроника одно из активно развивающихся направлений современной микроэлектроники, в которой характеристики материалов

контролируются путем деформаций [1]. Деформации можно индуцировать электрическим полем за счёт пьезоэлектрического эффекта или электрострикции. В некоторых кристаллах с помощью объёмного фотовольтаического эффекта (ОФЭ) можно освещением создать поле высокой напряжённости [2, 3].

Целью работы является экспериментальное наблюдение и исследование деформаций в нецентросимметричных кристаллах ниобата лития с примесью железа ($\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$), индуцированных в результате ОФЭ, с помощью комплекса рентгенодифракционных методик.

Рентгенодифракционные исследования проводились на лабораторном трёхкристальном рентгеновском спектрометре ТРС-К с характеристической длиной волны λ [$\text{MoK}\alpha 1$] = 0,70932 Å, кремниевым кристаллом-монокроматором Si с ориентацией поверхности (220) и углом Брэгга $\theta_M = 10,64^\circ$. Образец освещался лазерным модулем (LASEVER LSR-520) с регулируемой мощностью до 1000 мВт и длиной волны 520 нм.

Применение времяразрешающих рентгенодифракционных методик (временное разрешение 25 мс) позволило по динамике деформации и её зависимости от порядка дифракции отделить фотоиндуцированный пьезоэлектрический эффект – пьезофотовольтаический эффект – от нагрева, сопутствующего воздействию лазера (рис. 1) [4].

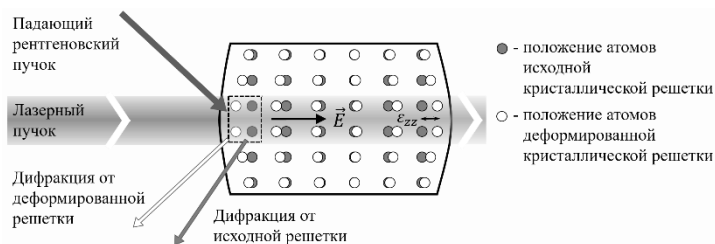


Рис. 1. Схема пьезофотовольтаического эффекта: воздействие лазера ($P = 1$ Вт) на кристалл $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ ($\text{Fe} = 0,02\%$) генерирует электрическое поле напряжённостью до 2,8 кВ/мм в направлении [001] и приводит к медленному нагреву

Список литературы

1. Bukharaev A.A., Zvezdin A.K., et al. // Physics – Uspekhi. 2018. 61 (12) 1175-1212.
2. Sturman B.I., Fridkin V.M. // Gordon and Breach Science Publishers. 1992.
3. Gu Z., Imbrenda D., et al. // Phys. Rev. Let. 2017. PRL 118. P.096601.
4. Pilyak F.S., Kulikov A.G., et al. // Physica B Condens. Matter. 2020. P. 412706. DOI: 10.1016/j.physb.2020.412706.

К.В. ПУЗАНОВСКИЙ, В.Е. ШЕЛКОВОЙ, Е.В. СТРОГАНОВА
Кубанский государственный университет, Краснодар

ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ КЕРАМИКИ LiNbO_3 С ОРГАНИЧЕСКИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ С ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В работе продемонстрирован режим формирования с помощью ТГц излучения whiskеров на подложке ниобата лития при напылении слоя керамики $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$.

K.V. PUZANOVSKIY, V.E. SHELKOVVOY, E.V. STROGANOVA
Kuban State University, Krasnodar

PREPARATION OF LiNbO_3 CERAMICS SAMPLES WITH ORGANIC INCLUSIONS USING TERAHERZ EMISSION

This work demonstrates the mode of formation of whiskers using THz emission on a lithium niobate substrate during the deposition of a layer of $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$ ceramic.

Изменениями в оптических спектрах редкоземельных ионов в различных кристаллических и стеклянных матрицах можно управлять, формируя пространственно-ограниченные кластеры, лимитирующие предельную величину кванта колебаний кристаллической решётки и позволяющих повысить квантовый выход люминесценции [1, 2]. Как правило, спектральная интенсивность излучения и длина волны максимума излучения зависит от концентрации и локальной симметрии кристаллического окружения редкоземельного иона в исследуемом материале. Использование спектров люминесценции для обнаружения кристаллической фазы возможно благодаря полученным результатам по увеличению точности проведения исследований и экономически низкой затратности технологии фазовых зондов относительно традиционных методик [1].

Целью исследования являлось экспериментальное изучение фазовых изменений в органических и комбинированных кристаллических материалах, в том числе и в керамике, под воздействием терагерцового излучения. Для достижения поставленной цели необходимо было синтезировать керамические образцы комбинированного типа (с органическими компонентами), активированные редкоземельными ионами. Для формирования керамических образцов комбинированного

типа использовался метод лазерной абляции. Одной из задач нанесения керамического покрытия на поверхность кристаллической подложки перовскита (ниобата лития) являлось улучшение адгезии и формирование условий для наноструктурирования оптических центров в напыляемом слое. Для улучшения адгезии поверхности подложки использовалось терагерцовое (ТГц) излучение, получаемое преобразованием ультракоротких лазерных импульсов с помощью полупроводниковой антенны на основе GaAs (MenloSystems). Использование терагерцового излучения заключалось в обработке поверхности подложки с поверхностным слоем органики во время процесса лазерной абляции. Нанесение слоя керамики происходило под воздействием YAG:Nd лазера, при этом подложка располагалась внутри вакуумного поста ВУП-5. ТГц излучение вводилось внутрь вакуумного поста через пластиковое смотровое окно.

Результаты обработки поверхности подложки ТГц излучением во время лазерной абляции слоя керамики ниобата лития с ионами Er представлены на рис. 1. Видно, что на подложке наблюдается рост вискерообразных структур, обусловленный наличием центров кристаллообразования на поверхности подложки, в том числе и органических включений.

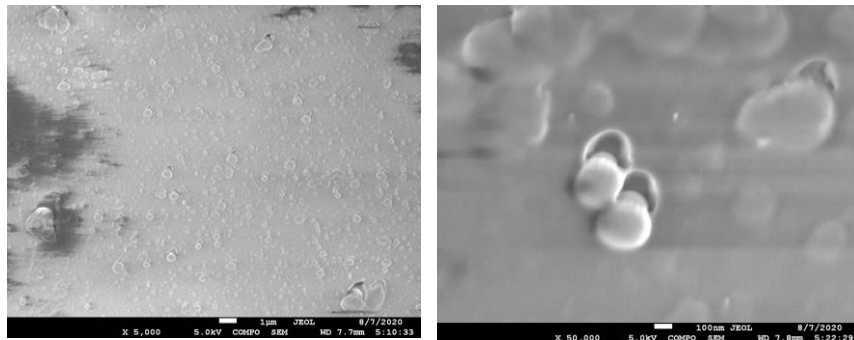


Рис. 1. Вискеры, $\text{LiNbO}_3:\text{Er}$, полученные на подложке после лазерной абляции на подложку LiNbO_3

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-42-230006 р_а.

Список литературы

1. Sukul P.P., Kumar K., Swart H. C. // OSA CONTINUUM. 2018. V. 1. No. 3. P. 971-980.
2. Galutskiy V.V., Ivashko S.S., Stroganova E.V. // Solid State Sciences. 2020. V. 108. P. 06355.

Д.А. ПЕРЕВОЩИКОВ¹, А.И. КАЛУГИН, Е.А. АНТОНОВ
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Ижевск
¹*ООО «ИРЗ ТЕСТ», Ижевск*

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ЭЛЕКТРОННУЮ СТРУКТУРУ КРИСТАЛЛА InSb

Исследовано влияние гидростатического сжатия кристаллической решётки InSb на структуру верхней валентной зоны и нижней зоны проводимости. Выявлены принципиальные изменения природы зон в центре зоны Бриллюэна, что приводит к существенным изменениям оптических свойств вблизи края собственного поглощения.

D.A. PEREVOSHCHIKOV¹, A.I. KALUGIN, E.A. ANTONOV
Udmurt Federal Research Center of Ural Branch RAS, Izhevsk
¹*JCS «IRZ TEST», Izhevsk*

THE EFFECT OF HYDROSTATIC COMPRESSION ON THE ELECTRONIC STRUCTURE OF THE InSb CRYSTAL

The effect of hydrostatic compression of the InSb crystal lattice on the structure of the upper valence band and of the lower conduction band is studied. Fundamental changes in the nature of the bands in the center of the Brillouin zone are revealed, that leads to significant changes of the optical properties near the intrinsic absorption edge.

Использование приближения локальной плотности (LDA) или обобщённого градиентного приближения (GGA) в расчётах зон полупроводников приводит к существенному занижению значений запрещённых зон [1]. Для решения данной проблемы можно применять оператор ножниц [2] или гидростатическое сжатие [3]. Для узкозонных полупроводников (InAs, InSb и т.д.) в подобных расчётах $E_g = 0$, что приводит к вырождению нижней зоны проводимости (НЗП) с верхней валентной зоной (ВВЗ) в точке Г и к перераспределению электронной плотности между данными уровнями.

В данной работе для InSb в рамках обменно-корреляционного потенциала GGA были рассчитаны зонные структуры с учётом спин-орбитального взаимодействия для двух вариантов параметров решётки (рис. 1): экспериментального ($a_1 = 6,48 \text{ \AA}$ [4]) и гидростатически сжатого ($a_2 = 6,27 \text{ \AA}$). ВВЗ вблизи точки Г зоны Бриллюэна имеет триплетную структуру, расщеплённую вследствие СОВ. Величина E_g в первом случае

равна нулю. При уменьшении параметра решётки на 3,2 % E_g увеличивается до 0,05 эВ. При этом первая и третья подзоны ВВЗ не изменяются, а вторая поднимается до первой. Расчёты парциальных вкладов плотности состояний показывают более принципиальные изменения в природе НЗП и ВВЗ (рис. 2). В первом случае вершина ВВЗ и дно НЗП образованы p -состояниями. При сжатии вклады s -состояний в НЗП в точке Γ резко увеличиваются. Таким образом, вершина ВВЗ и дно НЗП имеют разную природу. Это приводит к тому, что оптические переходы вблизи края поглощения становятся разрешёнными, а коэффициент поглощения резко увеличивается.

Исследование влияния сжатия кристаллической решётки на электронную структуру показало, что применение гидростатического сжатия кристаллической решётки приводит, с одной стороны, к лучшему согласию теоретического и экспериментального значений E_g , а, с другой стороны, вызывает принципиальные изменения природы зон, что может быть некорректно. Данный эффект требует дополнительных исследований.

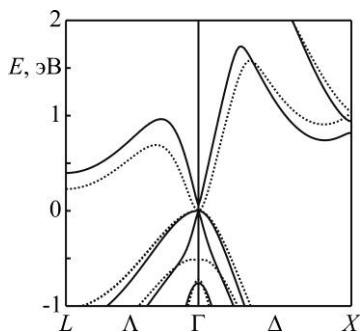


Рис. 1. Зонная структура InSb при параметре решётки a_1 (пунктирные кривые) и a_2 (сплошные кривые)

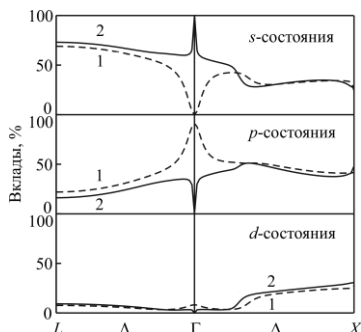


Рис. 2. Парциальные вклады s -, p - и d -состояний при формировании НЗП InSb при параметрах решётки a_1 (1) и a_2 (2)

Список литературы

1. Fuchs F., Furthmuller J., Bechstedt F., et al. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 115109.
2. Gulans A., Kontur S., et al. // J. Phys. Condens. Matter. 2014. V. 26. P. 363202.
3. Соболев В.В., Перевощиков Д.А. // ФТП. 2016. Т. 50. С. 582.
4. Martienssen W., Warlimont H. Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. Springer, 2005.

Т.А. ЖУРИН, М.Г. КИСТЕНЕВА, С.М. ШАНДАРОВ, В.Г. ДЮ,
Ю.Ф. КАРГИН¹

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ КРИСТАЛЛА $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$

Представлены результаты численного моделирования дифференциальных характеристик спектра пропускания легированного кальцием и галлием кристалла титаната висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}, \text{Ga}$.

T.A. ZHURIN, M.G. KISTENEVA, S.M. SHANDAROV, V.G. DYU,
Yu.F. KARGIN¹

*Tomsk State University of Control System and Radioelectronics
¹Baikov Institute of Metallurgy and Material Sciences of the RAS, Moscow*

NUMERICAL SIMULATION OF THE DIFFERENTIAL PARAMETERS OF TRANSMISSION SPECTRA OF $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$

The results of a numerical calculations of the differential parameters of the transmission spectrum of the $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca}, \text{Ga}$ crystal related to sillenite class are presented.

Исследованные в [1] дифференциальные характеристики спектров пропускания кристалла $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ показывают возможность идентификации дефектов, для которых имеют место внутрицентровые переходы. Результаты численного моделирования по методике, описанной в [1], для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ с толщиной $d = 8,9$ мм представлены в настоящей работе. Для описания спектральной зависимости оптического поглощения в кристалле $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Ca},\text{Ga}$ использовалась модель, учитывающая вклады в него как процессов фотовозбуждения электронов в зону проводимости с донорных центров, так и внутрицентровых переходов [2]. На рис. 1а представлены спектральные зависимости для оптического пропускания (кривая 1) и его первой (2) и второй (3) производных, полученные в результате моделирования. На рис. 1б (кривые 1-3) показаны спектральные зависимости гауссовых компонент,

использованных при моделировании и дающих аддитивный вклад внутрицентровых переходов в примесное поглощение.

На спектральной зависимости второй производной проявляются два ярко выраженных максимума при $\lambda = 504$ и 710 нм и широкий максимум при $\lambda = 1024$ нм (кривая 3 на рис. 1а). Вертикальные линии на рис. 1 проведены через эти максимумы. Спектральное положение максимумов для учитываемых при моделировании гауссовых компонент, расположенных при $\lambda = 494$ и 697 нм (кривые 1 и 2 на рис. 1б), близки по спектральному положению к максимумам для второй производной. Однако между максимумом второй производной на длине волны $\lambda = 1024$ нм и максимумом гауссовой компоненты 3 при $\lambda = 790$ нм, наблюдается значительный сдвиг.

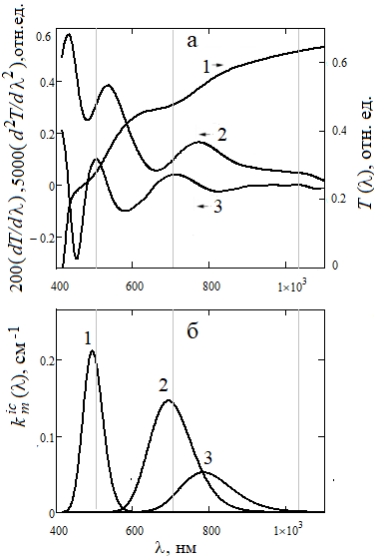


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента пропускания $T(\lambda)$ и его производных для кристалла $\text{Bi}_{12}\text{Ti}_2\text{O}_{20}:\text{Ca,Ga}$ (а) и трёх гауссовых компонент $k_m^{ic}(\lambda)$, дающих аддитивный вклад в показатель поглощения (б)

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2020-2022 годы (задание FEWM-2020-0038/3).

Список литературы

1. Журин Т.А., Сим Е.С., Дю В.Г., Кистенева М.Г., Шандаров С.М. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 9. С. 1254-1257.
2. Кистенева М.Г., Худякова Е.С., Шандаров С.М. и др. // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 7. С. 685-690.

И.М. КРОЛЬ, О.П. БАРИНОВА, М.П. ЗЫКОВА, О.Б. ПЕТРОВА
Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ В ВИДИМОЙ И ИК-ОБЛАСТЯХ КОБАЛЬТСОДЕРЖАЩЕГО ЦИНКБОРОСИЛИКАТНОГО СТЕКЛОВИДНОГО МАТЕРИАЛА

В системе $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ при $1170\text{ }^\circ\text{C}$ получен стекловидный материал, легированный кобальтом (ZBS:Co стекло), содержащий кристаллическую фазу виллемита (Zn_2SiO_4). При исследовании спектров поглощения в оптической и ближней ИК-областях показана перспективность ZBS:Co стекла для пассивных модуляторов добротности.

I.M. KROL, O.P. BARINOVA, M.P. ZYKOVA, O.B. PETROVA
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

STUDY OF ABSORPTION SPECTRA IN VISIBLE AND IR RANGE OF COBALT-CONTAINING ZINC BOROSILICATE GLASS MATERIAL

In the $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ system at $1170\text{ }^\circ\text{C}$, a cobalt-doped glassy material (ZBS: Co glass) containing the crystalline willemite phase (Zn_2SiO_4) was obtained. When studying absorption spectra in the optical and near-IR regions, ZBS: Co glass is shown to be promising for passive Q-switches.

Кобальтсодержащие прозрачные материалы представляют интерес в качестве пассивных модуляторов добротности (ПМД) [1]. Благодаря технологичности получения и наличия соответствующих функциональных свойств перспективно применение стекловидных материалов [2, 3], особенно в системе $ZnO-B_2O_3-SiO_2$.

Объектом исследования в работе было кобальтсодержащее цинкборосиликатное (ZBS:Co) стекло, массовая доля легирующей добавки составляла $0,03\text{ масс.}\%$ CoO. Стекло было получено в корундовом тигле при температуре $1170\text{ }^\circ\text{C}$ и времени варки 80 минут с последующей выработкой на металлическую поверхность и термообработкой при $600\text{ }^\circ\text{C}$ в течение трёх часов. Полученное ZBS:Co стекло синего цвета было прозрачно, не содержало видимых дефектов. РФА показал наличие аморфного гало с долей кристаллической фазы виллемита Zn_2SiO_4 .

Спектр поглощения полученного ZBS:Co стекла исследовали в видимом диапазоне (300 – 1100 нм). Анализ оптического спектра ZBS:Co стекла методом разложения на гауссианы показал наличие трёх полос поглощения, соответствующих переходам ${}^4A_2(F) \rightarrow {}^2A_1(G)$ (Oh), ${}^4A_2(F) \rightarrow {}^4T_1(P)$ (Td), ${}^4A_2(F) \rightarrow {}^2E^2(G)$ (Oh) (рис. 1). Наличие трёх полос поглощения показывает, что кобальт в исследуемом стекле находится в различных координационных (тетраэдрическом «Td» и октаэдрическом «Oh») состояниях. Для оценки перспективности применения ZBS:Co стекла в качестве материала для пассивного модулятора добротности исследовали спектр поглощения в ближнем ИК-диапазоне 1250 – 1800 нм. Установлена широкая полоса поглощения, соответствующая переходу ${}^4A_2 \rightarrow {}^4T(F)$ (Td) (рис. 2), которая обусловлена наличием тетракоординированного кобальта в исследуемом материале.

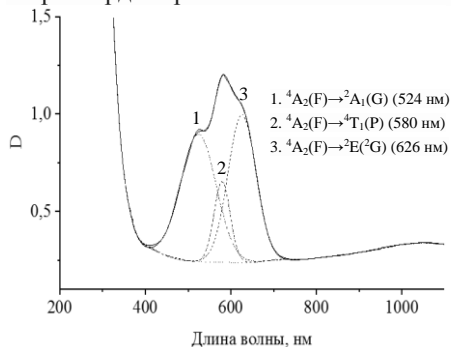


Рис. 1. Спектр поглощения ZBS:Co стекла в диапазоне 300 - 1100 нм

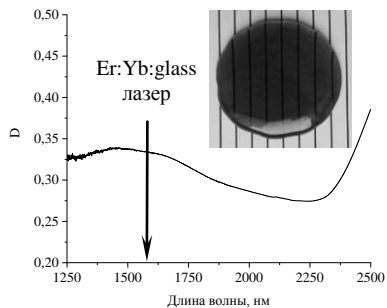


Рис. 2. Спектр поглощения ZBS:Co стекла в ИК-диапазоне 1250 - 1800 нм

В результате проведённого исследования изучены спектры поглощения в оптической и ближней ИК-областях для полученного легкоплавкого материала на основе ZBS:Co стекла с частичной кристаллизацией виллемита Zn_2SiO_4 . Наличие широкой полосы поглощения в диапазоне 1300 - 1800 нм показывает перспективность применения ZBS:Co стекла для пассивных модуляторов добротности, например, для Er:Yb:glass лазера.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту FSSM-2020-0005.

Список литературы

1. Malyarevich A.M., Yumashev K.V. // Journal of applied spectroscopy. 2009. V. 76. P. 1-43.
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.

И.В. БОГАЧКОВ, А.С. СТАРКОВ
Омский государственный технический университет

УЛУЧШЕНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В работе рассмотрены вопросы построения схем рефлектометров для ранней диагностики состояния оптических волокон. Результаты представляют интерес для совершенствования систем мониторинга оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV, A.S. STARKOV
Omsk State Technical University

IMPROVEMENT OF DEVICES FOR PREDICTING THE STATE OF OPTICAL FIBERS

The paper deals with the construction of schemes of reflectometers for early diagnostics of the state of optical fibers. These results are of interest for improving optical fiber monitoring systems.

Обеспечение бесперебойной работы волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) требует совершенствования систем мониторинга для своевременного обнаружения неисправностей в оптических волокнах (ОВ), а также прогнозирования состояния ОВ. Ранняя диагностика ОВ предполагает заблаговременное выявление «проблемных» участков ОВ в проложенных оптических кабелях (ОК), которые с течением времени могут нарушить нормальную работу ВОЛС [1, 2]. В системе мониторинга ВОЛС для контроля механического натяжения ОВ и температуры можно использовать бриллюэновские импульсные рефлектометры (БОИР) [1, 2].

На рис. 1 представлена усовершенствованная схема [2] по сравнению с БОИР [1], в которой оценивается влияние температуры (система датчиков Т (16)), а также учитываются данные рэлеевской рефлектограммы.

БОИР работает следующим образом. Излучение лазера Л (1) проходит через формирователь импульсов ФИ (2), который создаёт импульсы заданными характеристиками под управлением блока обработки М (15), на вход эрбиевого усилителя ЭрУ (3), с выхода которого усиленный сигнал поступает на регулируемый аттенюатор РАт (4), устанавливающий оптимальный уровень мощности сигнала (в зависимости от длины ОВ и его типа), с выхода РАт сигнал поступает на вход циркулятора Ц (5), а с его выхода через соединитель ОС (6) – в тестируемое ОВ.

Излучение обратного рассеяния тестируемого ОВ, которое содержит компоненты рассеяния Рэлея и РМБ, через второй выход Ц поступает на вход разветвителя (ОР) 7, который делит сигнал на два потока.

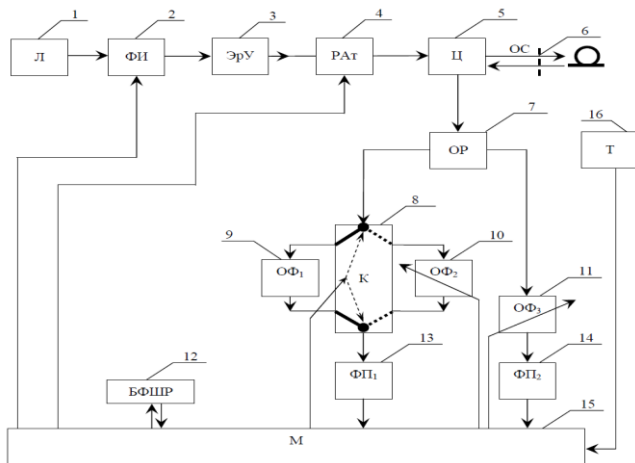


Рис. 1. Структурная схема прибора для ранней диагностики ВОЛС

Излучение с первого выхода ОР 7 поступает на основной вход оптического коммутатора К (8), который переключает сигнал сначала на первый канал (оптический фильтр ОФ₁ (9), настроенный на частоту рэлеевского рассеяния, а после снятия рэлеевской рефлектограммы, переключает до конца процесса измерений на второй канал ОФ₂ (10), с перестраиваемой полосой пропускания (как и у ОФ₃ (11)). Электрические сигналы с выхода фотоприёмников ОФ₁ и ОФ₂ оцифровываются и поступают для дальнейшей обработки в М (15). Блок БФШР (12) хранит шаблоны характеристик РМБ различных типов ОВ. После снятия рэлеевской рефлектограммы для получения бриллюэновских рефлектограмм анализируются интенсивности частотных фрагментов прошедших ОФ₂ и ОФ₃. После этого по адаптивному алгоритму определения шага сканирования фильтры перестраиваются на другие частоты, определяется спектр РМБ и частота максимума РМБ.

Список литературы

1. Богачков И.В. Оптический бриллюэновский рефлектометр Пат. РФ № 186231. Заявл. 10.10.2018. Оpubл. 11.01.2019. Бюл. № 2.
2. Богачков И.В. Оптический рефлектометр для ранней диагностики волоконно-оптических линий связи. Пат. РФ № 195647. Заявл. 13.12.2019. Оpubл. 03.02.2020. Бюл. № 4.

А.С. ЛУЦЕНКО^{1,2}, А.Р. РАХМАТУЛЛИНА^{1,2}, Н.А. ГРАЧЁВ²

¹*Пермский научно-исследовательский политехнический университет*

²*Пермская научно-производственная приборостроительная компания*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРА: ВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ УСТРОЙСТВА ОПРОСА КВАЗИРАСПРЕДЕЛЁННОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Работа посвящена вопросу определения количественного параметра: воспроизводимость устройства опроса волоконно-оптических чувствительных элементов с резонансным спектральным откликом. Представлены результаты измерения и их интерпретация.

A.S. LUTSENKO^{1,2}, A.R. RAKHMATULLINA^{1,2}, N.A. GRACHEV¹

¹*Perm National Research Polytechnic University*

²*Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company*

RESEARCH OF THE REPRODUCIBILITY PARAMETER OF INTERROGATOR FOR QUASI-DISTRIBUTED SENSOR

The paper is devoted to the problem of determining the quantitative reproducibility parameter of interrogator for fiber-optic sensors with a resonant spectral response. The measurement results and their interpretation are presented.

Развитие сенсорных волоконно-оптических технологий обусловлено потребностью в прецизионной точности измерения как значений отдельных физических параметров, так и их совокупности [1]. В настоящее время в России не существует эталонных методов количественной оценки параметров устройства опроса и сопрягаемой волоконной линии с чувствительными элементами, по этой причине дефекты прибора выявляются уже в ходе эксплуатации.

В работе предложен метод измерения воспроизводимости длин волн устройства опроса. Ключевыми элементами устройства опроса являлись полупроводниковый источник оптического излучения, перестраиваемый фильтр на основе интерферометра Фабри-Перо, работающий в третьем окне прозрачности волокна и фотоприёмный модуль. Чувствительными элементами выступали однородные волоконные брэгговские решётки.

Воспроизводимость длин волн определяется как среднеквадратическое отклонение значений разных длин волн за определённый интервал

времени от одного источника излучения при многократных включениях и выключениях.

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Тринадцать решёток, записанных в одномодовом изгибоустойчивом световоде, были выдержаны в сухоблочном калибраторе температур до принятия равновесной температуры с погрешностью $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (соответствует смещению резонансного спектра менее чем на 1 пм). Области спектров для расчёта центральных длин волн описывались функцией Гаусса. Частота дискретизации составляла 100 Гц. Визуально среднеквадратическое отклонение по разным длинам волн при трёх итерациях измерения представлены на рис.2.

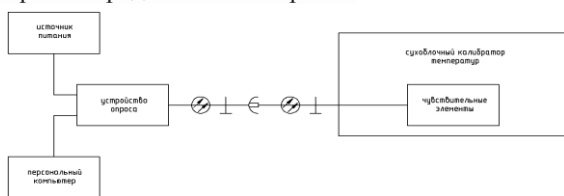


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

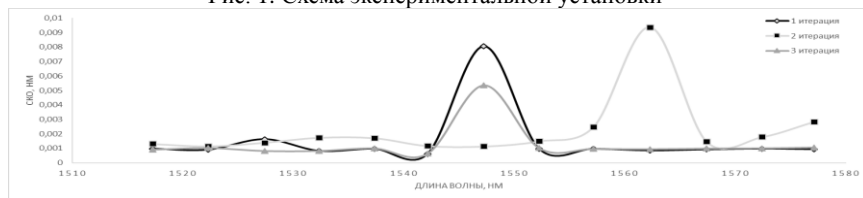


Рис. 2. Зависимость СКО от усреднённой длины волны отражения

Проявляющееся увеличение СКО, при соблюдаемой пилообразной форме сигнала генератора качающейся частоты, управляющей перестройкой излучения в фильтре Фабри-Перо, можно связать с тем, что данные спектральные диапазоны приходятся на нелинейные участки зависимости изменения длины волны излучения от времени. Причиной этого, как мы считаем, является сложно описываемый характер зависимости деформации от приложенного напряжения при обратном пьезоэффекте в конструкции перестраиваемого фильтра. Результат исследования демонстрирует воспроизводимость длин волн при использовании оптомеханического фильтра Фабри-Перо порядка 2 пм, в области нелинейной перестройки длин волн до 9 пм.

Список литературы

1. Udd E. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists. 2nd ed. 2011.

И.В. БОГАЧКОВ, А.С. СТАРКОВ, В.А. ДЫШЛЕВСКИЙ
Омский государственный технический университет

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗГИБОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА РЕФЛЕКТОГРАММЫ

В работе рассмотрены вопросы оценки влияния изгибов одномодовых оптических волокон различных видов на рефлектограммы. Приведены результаты исследований бриллюэновских рефлектограмм при различных диаметрах изгиба.

I.V. BOGACHKOV, A.S. STARKOV, V.A. DYSHLEVSKIY
Omsk State Technical University

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF OPTICAL FIBER BENDS ON REFLECTOGRAMS

Questions of evaluating the influence of bends of single-mode optical fibers of various types on reflectograms are considered in this work. The results of studies of Brillouin reflectograms for different bending diameters are presented.

При изгибе оптического волокна (ОВ) из-за выхода части излучения из ОВ на границе раздела «сердцевина-оболочка» появляются возможности реализации локального несанкционированного доступа (НСД) [1-3].

Изгиб ОВ вносит дополнительные оптические потери в ОВ, увеличивающиеся с кривизной (уменьшением радиуса изгиба) ОВ, что может быть обнаружено на бриллюэновских рефлектограммах [1-3], а при малом радиусе изгиба – и обычным оптическим импульсным рефлектометром.

На рис. 1 показан пример обычной рефлектограммы при изгибе ОВ.

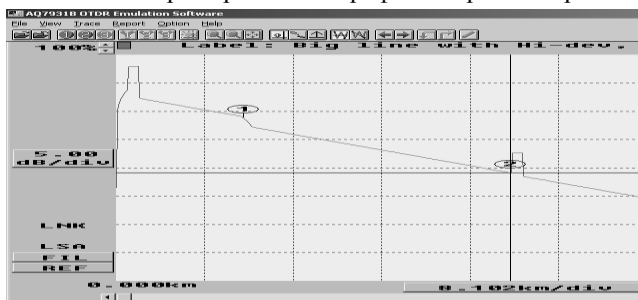


Рис. 1. Вид рефлектограммы при изгибе оптического волокна

Так как события «изгиб» и «сварочное соединение» отображаются весьма похоже, следует провести измерения и на других длинах волн. С увеличением длины волны изгиб проявится сильнее. Для сварного стыка ОВ подобных изменений наблюдаться не будет [3].

Бриллюэновская рефлектограмма показывает хорошую чувствительность к изгибам и микроизгибам. Изгиб ОВ обнаруживается из-за изменения уровня обратно отражённого сигнала [2].

На рис. 2 приведены графики внесённого затухания (A , дБ) в области изгиба в зависимости от диаметра полупетли для всех рассмотрённых ОВ.

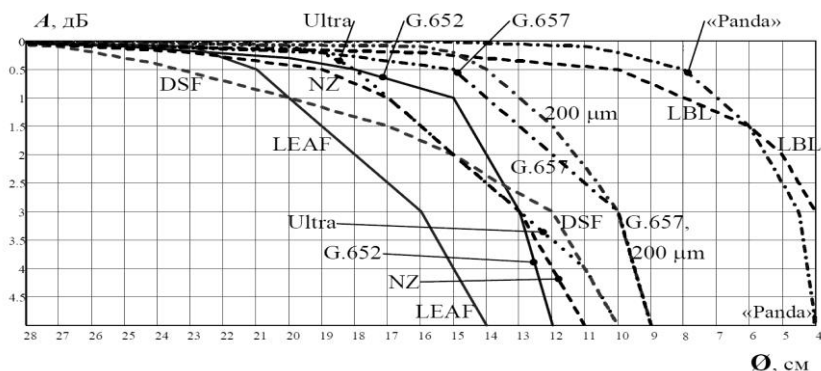


Рис. 2. Графики внесённого затухания $A(\varnothing)$ в области изгиба

У большинства ОВ изменения на бриллюэновских рефлектограммах начинают наблюдаться при диаметре изгиба в форме полупетли 20 - 25 мм, что может быть использовано в системе мониторинга ОВ ВОЛС для обнаружения НСД [1 - 3].

Изменение бриллюэновского сдвига частоты, вызванное изгибом из-за совместного влияния смещения оптического пучка и растяжения, составляет единицы МГц, и поскольку бриллюэновский рефлектометр регистрирует «усреднённый» по сечению луч, эти изменения незаметны, в отличие от изменения уровня сигнала РМБ.

Список литературы

1. Горлов Н.И., Богачков И.В. Принципы информационной безопасности физических каналов оптических сетей доступа // Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 145-149.
2. Bogachkov I.V. Researches of bend influences on Brillouin reflectograms of different types of optical fibers // T-comm. 2019. V. 13. No. 3. P. 75-79.
3. Bogachkov I.V., Gorlov N.I., Kitova E.T. Information security monitoring security in optical access networks // Problems of informatics, electronics and radio engineering pier. Novosibirsk, NSTU, 2020. P. 1-5.

И.В. БОГАЧКОВ, А.С. ТЮЛЕНЕВ
Омский государственный технический университет

ПРОГРАММА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОГРАММ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

В статье описана программа для автоматизированной обработки данных бриллюэновских рефлектограмм одномодовых оптических волокон.

I.V. BOGACHKOV, A.S. TYULENEV
Omsk State Technical University

A PROGRAM FOR AUTOMATED PROCESSING OF BRILLOUIN REFLECTOGRAMS OF OPTICAL FIBERS

A program for automatized processing of data from Brillouin reflectograms of single-mode optical fibers is described in this paper.

Наличие базы данных характеристик рассеяния Манделъштама – Бриллюэна (РМБ) оптических волокон (ОВ) различных типов и производителей позволяет классифицировать разновидности ОВ, оценивать состояние ОВ в оптическом кабеле (ОК), обнаруживать ненадёжные участки ОК, прогнозировать долговечность ОВ в ОК [1].

С целью автоматизации и ускорения процесса формирования базы данных характеристик РМБ ОВ по бриллюэновским рефлектограммам, оценки бриллюэновского сдвига частоты (БСЧ – f_B) и натяжения ОВ были разработаны специальные программы [1 - 3]. Работа программ основана на анализе выходного файла рефлектометра, после загрузки которого запускается процесс выделения части изображения, необходимой для анализа характеристик РМБ и классификации типа ОВ.

Необходимая область для анализа автоматически «вырезается» программой (рис. 1), формируется профиль СРМБ ОВ, который выводится на экран (среднее верхнее изображение), а также выделяются данные, необходимые для определения характеристик СРМБ. На следующем этапе программа выводит начальную и конечную частоты сканирования (в ГГц), а также интенсивность (в дБ) уровня обратно отражённого сигнала РМБ в максимуме (правый верхний угол). Пользователь имеет возможность корректировать данные характеристики.

После нажатия кнопки «Аппроксимировать» полученный профиль СРМБ ОВ сравнивается с шаблонами из базы данных программы на основе специального алгоритма, осуществляющего корреляционную оценку [1 - 3], после чего выводится шаблон, имеющий наилучшее совпадение (подсвечивается зелёным цветом).

Для работы программы в режиме выявления фактора воздействия и компенсации влияния температуры на БСЧ и натяжение ОВ следует активировать вкладку «Мульти», после чего необходимо загрузить файл мультирефлектограммы [1]. Необходимые для дальнейшего анализа данные автоматически выделяются программой, затем формируются СРМБ ОВ, графики натяжения и уровня обратно отражённого сигнала.

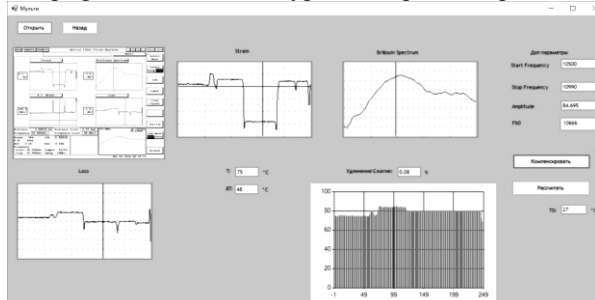


Рис. 1. Копия экрана при расчёте БСЧ, температуры, натяжения и компенсаций изменений натяжения, вызванных изменением температуры

После нажатия кнопки «Расчитать» производится вычисление изменения БСЧ относительно начального, и далее рассчитывается натяжение ОВ, а также находится температура исследуемого ОВ и её изменения (« ΔT ») относительно начальной (« T_0 »).

По графику уровня обратно отражённого сигнала («Loss») определяется изменение БСЧ, которое вызвано только изменением температуры, и после нажатия кнопки «Компенсировать») производится соответствующая компенсация в зависимостях продольного натяжения.

Список литературы

1. Богачков И.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019667360. Программа для выявления типа воздействия на оптические волокна и определения их натяжения. 2019666447; заявл. 13.12.2019. опублик. 23.12.2019.
2. Богачков И.В., Иниватов Д.П., Чобан А.Г. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 23734. Программа для автоматического определения типа оптического волокна по Brillouin-рефлектограмме. Опублик. 14.08.2018.
3. Богачков И.В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019610752. Программа для классификации разновидностей оптических волокон по Brillouin-рефлектограммам. 2018662391; заявл. 07.11.2018; опублик. 18.01.2019.

И.В. БОГАЧКОВ, В.А. ДЫШЛЕВСКИЙ
Омский государственный технический университет

УЛУЧШЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН В БРИЛЛЮЭНОВСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРАХ

В работе обсуждаются вопросы совершенствования алгоритмов определения натяжения оптических волокон в бриллюэновских рефлектометрах. Рассмотрен адаптивный алгоритм построения графика натяжения вдоль световода.

I.V. BOGACHKOV, V.A. DYSHLEVSKIY
Omsk State Technical University

IMPROVEMENT OF ALGORITHMS FOR DETERMINING THE OPTICAL FIBER STRAIN IN BRILLOUIN REFLECTOMETERS

The paper discusses the improvement of algorithms for determining the strain of optical fibers in Brillouin reflectometers. An adaptive algorithm for the strain definition along the fiber is considered.

Опыт работы с бриллюэновскими оптическими импульсными рефлектометрами (БОИР) показал, что процесс измерения при высокой разрешающей способности происходит очень медленно [1, 2].

Перед началом измерения задаются диапазон и шаг сканирования, который является равномерным и зависит от заданного количества точек наблюдения, а также количество усреднений. При 50 точках измерения, пространственной точности представления рефлектограммы 0.05 м, и количестве усреднений 2^{17} процесс получения картин бриллюэновского сдвига частоты (максимума бриллюэновского спектра – f_B) и натяжения может занять около одного часа. Процесс определения f_B можно существенно ускорить, если сделать процесс измерений адаптивным [2].

Анализ БОИР-рефлектограмм [1] показывает, что не все отсчёты, взятые в узлах рефлектограммы с шагом по частоте и продольной координате, представляют интерес для получения итогового результата.

На рис. 1 приведены пояснения к обсуждаемому алгоритму обработки рефлектограмм БОИР, N соответствует номеру текущего отсчёта, $z_1 > z_2 > z_i$ – значения в фиксированных поперечных сечениях.

На начальном этапе диапазон измерений разбивается на 4 одинаковых части: кроме начальной (f_1) и конечной (f_2) частот, определяются ещё три отсчёта, отстоящие друг от друга на величину шага. После этого в каждом поперечном сечении z_i , определяется интенсивность отражённого сигнала $I(f, z)$ и выбирается максимальное значение для текущих отсчётов (1 - 5).

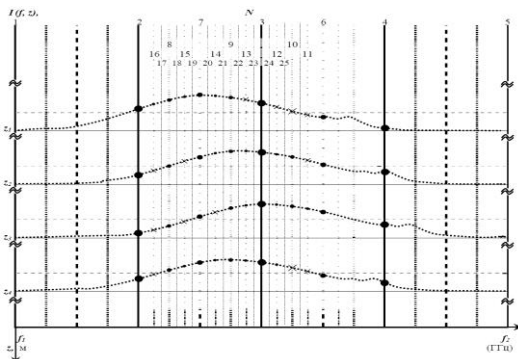


Рис. 1. Выбор отсчётов рефлектограмм при адаптивном алгоритме

Затем шаг изменения частоты уменьшается в два раза, но следующие построения рефлектограмм по частотам обратно отражённого сигнала будут проводиться только на участках с уровнями сигналов, соизмеримых по мощности с максимумом, для каждого сечения (отсчёты 6 - 7).

На рис. 1 «полезные» отсчёты обозначены «точками» на профилях спектра, а отсчёты, не представляющие интереса для определения f_B , – «крестиками». После этого процесс циклически повторяется в области нового положения максимума с уменьшенным в два раза шагом. На рис. 1 третьему шагу соответствуют отсчёты 8 - 10, четвёртому – 11 - 16 и т.д.

В результате получается существенное ускорение процесса за счёт прореживания отсчётов, не оказывающих влияния на итоговый результат.

Если на некотором шаге процесса максимум обнаружен, то параллельно основному процессу можно запустить вычисление натяжения ОВ вдоль световода. Другим способом ускорения процесса является адаптивное изменение времени накопления данных измерений.

Список литературы

1. Богачков И.В. Совершенствование алгоритмов определения натяжения оптических волокон с помощью бриллюэновских рефлектометров // Динамика систем, механизмов и машин. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2019. Т. 7. № 4. С. 178-184.
2. Bogachkov I.V. Improved algorithms for determining the strain of optical fibers using Brillouin reflectometers // Journal of Physics: Conference Series, 2020. V. 1441 (1).

С.А. ТАРАСОВ¹, Т.А. РАДЗИЕВСКАЯ^{1,2}, Н.Н. ИВАНОВ³

¹*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)*

²*АО «НИТИ «Авангард», Санкт-Петербург*

³*Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича*

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ НА РАССЕЯНИЕ В ПОЛИМЕРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

Предложены и экспериментально реализованы технологические методы устранения факторов роста потерь на рассеяние при формировании полимерных планарных оптических волноводов. Определены условия, причины формирования и способ устранения отрицательного наклона фоторезистивной маски мастер-штампа мягкой литографии, применяемой при изготовлении полимерных планарных оптических волноводов из неспециализированных полимеров.

S.A. TARASOV¹, T.A. RADZIEVSKAYA^{1,2}, N.N. IVANOV³

¹*Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI"*

²*JSC «NITI «Avangard», Saint-Petersburg*

³*Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications*

TECHNOLOGICAL METHODS TO REDUCING SCATTERING LOSSES IN POLMERIC PLANAR OPTICAL WAVEGUIDES

Technological methods for factors elimination of reducing scattering losses during polymer planar optical waveguides fabrication are proposed and experimentally implemented. The conditions and reasons for the photoresist mask negative slope of soft lithography master stamp used in the polymer planar optical waveguides fabrication from general use non-specialized polymers are determined.

Полимерные материалы предоставляют отличные возможности для формирования изделий интегральной оптики. Однако, в таких изделиях наблюдается существенный рост потерь оптического излучения в сравнении с полупроводниковыми аналогами. Причинами этого могут являться собственные потери полимера, а также недостаточность отработки технологического процесса изготовления [1] и другие.

Целью работы является экспериментальное исследование подходов к снижению потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах, изготовленных по технологии мягкой литографии из неспециализированного полимера общего применения PDMS.

При анализе причин роста потерь на рассеяние было выявлено, что их величина пропорциональна сумме квадратов шероховатости поверхностей элементов полимерных планарных оптических волноводов [2]. При отработке технологического процесса было установлено, что величина шероховатости зависит от условий извлечения полимерных планарных оптических волноводов из мастер-штампа. В качестве негативных факторов роста шероховатости отмечены избыточная и неоднородная адгезия полимера к материалу мастер-штампа [3], а также наличие отрицательного наклона стенок мастер-штампа, изготовленного по технологии фотолитографии из негативного фоторезиста SU-8 [4].

Для снижения адгезии полимера к мастер-штампу и увеличения её однородности в технологический процесс были введены этапы изготовления дополнительного подслоя мастер-штампа и обработки гексаметилдисилазаном (HMDS). Установленной причиной отрицательного наклона стенок фоторезистивной маски является применение широкополосного УФ-излучения при проведении фотолитографии [4]. Применение светофильтра оригинальной конструкции, реализованной авторами, позволило изменить спектр УФ-излучения, которым облучается фоторезист, и устранить формирование “наростов”, спровоцированных наличием отрицательного наклона фоторезистивной маски (рис. 1), что обеспечило снижение потерь на рассеяние в исследуемом полимерном планарном оптическом волноводе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 14376ГУ/2019 от 11.07.2019).

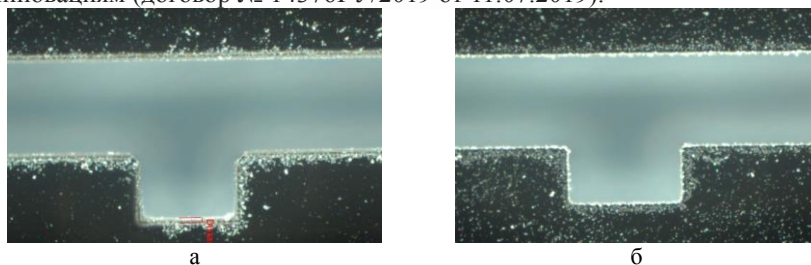


Рис. 1. Топология мастер-штампа (вид сверху): без светофильтра (с “наростами” 4 мкм) (а); со светофильтром оригинальной конструкции (без “наростов”) (б)

Список литературы

1. Ma H., Jen A.K.Y., et al. // *Advanced Materials*. 2002, V. 14, Is. 19. P. 1339-1365.
2. Osovitskii A.N. // *Journal of Comm. Technology and Electronics*. 2011. V. 56, No. 1. P. 35.
3. Manvelova T.A. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, V.1400. Is. 6. P. 066051
4. Mitra S.K. *Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications*. USA, Irvine: CRC Press, 2011.

И.В. БОГАЧКОВ, А.В. ХОМЧЕНКО
Омский государственный технический университет

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ВЛИЯНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
НА УРОВЕНЬ ПРИНЯТОГО СИГНАЛА**

В работе описана виртуальная лабораторная работа для изучения влияния поляризационных потерь на уровень принимаемого сигнала, разработанная в ОмГТУ.

I.V. BOGACHKOV, A.V. HOMCHENKO
Omsk State Technical University

**DEVELOPMENT OF THE PROGRAM TO STUDY
THE POLARIZATION LOSSES INFLUENCES
ON THE RECEIVED SIGNAL INTENSITY**

The virtual laboratory work to study the polarization losses influences to the level of the received signal developed in Omsk State Technical University is presented.

Разработка виртуальных лабораторных работ потребовалась для проведения занятий в дистанционной форме. Это стало сначала желательным для студентов заочной и очно-заочной форм обучений радиотехнических и инфокоммуникационных направлений подготовки, но затем (с марта 2020 г.) оказалось актуальным и для студентов очной формы обучения.

После запуска программы на рабочей панели (рис. 1) можно увидеть (представленные слева направо) источник изучения, поляризатор, анализатор и приёмник излучения, график зависимости интенсивности света от угла поворота.

Данная программа помогает оценить интенсивность света, прошедшего два поляроида (поляризатор и анализатор) [1, 2].

С помощью первого «ползунка», расположенного в левой части экрана, необходимо выбрать значение угла поворота анализатора в диапазоне от 0 до 360 °.

С помощью второго «ползунка» можно задать погрешность поляризатора, влияющей на график зависимости интенсивности света.

С помощью третьего «ползунка» определяется интенсивность падающего света (от 100 до 1000).

В приёмнике излучения можно увидеть рассчитанное значение интенсивности света, выходящего из анализатора [2].

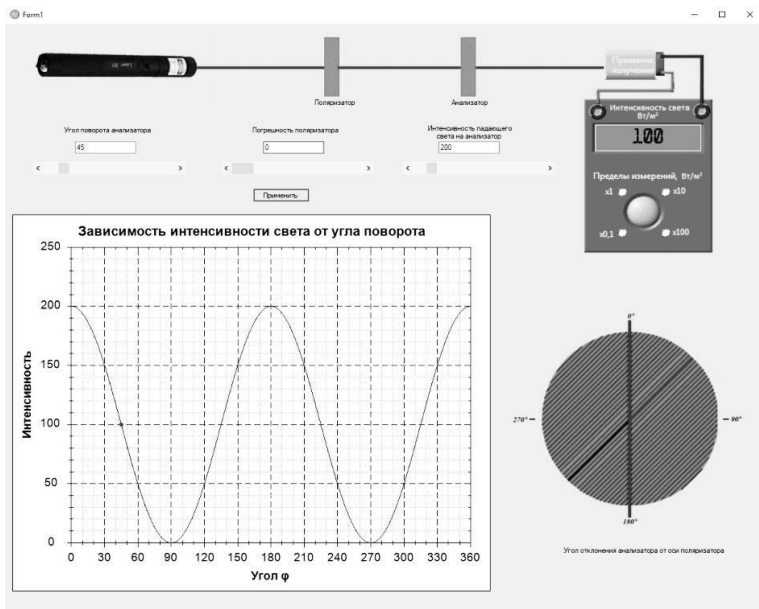


Рис. 1. Вид рабочего экрана программы

С помощью графика, представленного в нижней части экрана, можно увидеть и проанализировать зависимость угла поворота анализатора от интенсивности падающего света. Красной точкой на графике обозначено выбранное значение угла поворота [2].

Кнопка «Помощь» поможет узнать информацию о данном программном обеспечении, а также перейти к методическим указаниям в случае затруднений.

В результате выполнения работы студенты должны осознать важность поляризационных характеристик оптического сигнала.

Список литературы

1. Богачков И.В. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие: в 2 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014.

2. Богачков И.В., Хомченко А.В. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24420. Изучение поляризации электромагнитных волн (ЭМВ) // ОмГТУ, опубли. 20.12.2019.

Е.Н. КОТЛИКОВ, Н.П. ЛАВРОВСКАЯ, А.Н. ТРОПИН¹
*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения*
¹*АО «НИИ Гириконд», Санкт-Петербург*

МЕТАЛЛОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОТКРЫТОГО ПЛАМЕНИ

Приведены результаты синтеза металлодиэлектрических интерференционных фильтров для датчиков открытого пламени. Их особенностью является то, что металлические плёнки помещены в узлах стоячей волны около одного из полуволновых резонансных слоёв, обрамлённых зеркалами из диэлектрических плёнок. Такая конструкция позволяет подавлять всё излучение в инфракрасной области спектра выше центрального максимума пропускания и обойтись без использования абсорбционных фильтров в ИК-области спектра на основе лейкосапфира. Приведены результаты проектирования трёхсекционного полосового интерференционного фильтра с максимальным пропусканием на длине волны 4.45 мкм.

E.N. KOTLIKOV, N.P. LAVROVSKAYA, A.N. TROPIN¹
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
¹*JSC "Research Institute Girikond", Saint-Petersburg*

METAL-DIELECTRIC INTERFERENCE FILTERS FOR FLAME SENSORS

The results of the synthesis of metal-dielectric interference filters for open flame sensors are presented. Their feature is that the metal films are placed at the nodes of the standing wave near one of the half-wave resonant layers framed by mirrors made of dielectric films. This structure makes it possible to suppress all radiation in the infrared region of the spectrum above the central maximum transmission and to dispense with the use of absorption filters in the infrared region of the spectrum based on leucosapphire. The results of the engineering a three-section bandpass interference filter with a maximum transmission at a wavelength of 4.45 μm are presented.

Датчики ИК-диапазона регистрируют излучение пламени ($\lambda = 4,45$ мкм) в системах пожаробезопасности.[1]. Для выделения диапазона используют интерференционные фильтры [2]. Оптимальным является использование полосовых интерференционных фильтров (ПИФ) [3, 4].

Нами синтезированы ПИФ с максимумом пропускания на $\lambda = 4,45$ мкм (рис. 1). Кривая 1 – ИФ со структурой П,В,2Н,В,Н,В,2Н,В,Н,В,2Н,В,Н,

где П – подложка (SiCZ), Н – низкопреломляющий слой из плёнок SiO, В – высокопреломляющий слой из плёнок Ge. На кривой 2 – спектр той же структуры с поглощением. Видно, что покрытия пропускают $\lambda > 7$ мкм и $\lambda < 3,5$ мкм. Отрезающим коротковолновым покрытием являются плёнки РbТе или Ge. Для отрезания длинноволнового излучения в этой работе использовались плёнки никеля, вводимые в структуру ИФ. Синтез ИП с использованием металлических плёнок базируется на работах [5 - 7]. Оптические константы Ni взяты из [8]. На рис. 2 приведено распределение квадрата напряжённости электрического поля в исследуемом покрытии для длины волны 4,45 мкм.

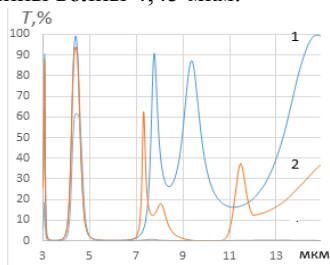


Рис. 1. Спектры интерференционных фильтров

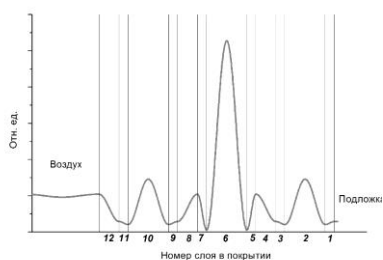


Рис. 2. Распределение напряжённости электрического поля внутри интерференционного фильтра

Из рис. 2 видно, что на границах резонансных слоёв 2, 6 и 10 напряжённость электрического поля минимальна. Подавление длинноволновой области высокое.

На примере проектирования ПФ продемонстрированы возможности увеличения ширины спектрального диапазона блокирования излучения для снижения длинноволнового пропускания за счёт использования тонких, толщиной до 10 - 15 нм, поглощающих металлических плёнок.

Список литературы

1. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонов М.В. // Изв. ВУЗ. 2015. Т. 58. № 2. С. 124-129.
2. Жиглинский А.Г., Кучинский В.В. Реальный интерферометр Фабри-Перо. Л.: Машиностроение. 1983.
3. Борисевич Н.А., Верещагин В.Г., Валидов М.А. Инфракрасные фильтры. Наука и техника, 1971.
4. Котликов Е.Н., Коваленко И.И., Новикова Ю.А. // ИУС. 2015. № 3(76). С. 51-59.
5. Троицкий Ю.В. Многолучевые интерферометры отраженного света. Новосибирск, 1985.
6. Голдина Н.Д., Захаров М.И., Троицкий Ю.В. // ЖПС. 1969. Т. 10. № 1. С. 43-48.
7. Котликов Е.Н. // Оптический журнал. 2020. Т. 87. Вып. 11. С. 81.87.
8. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнов Е.В. Оптические постоянные природных и технических средств. Справочник. Л.: Химия. 1984.

В.А. НИКИТИН, В.В. СЕРДЮКОВ, Н.А. ЯКОВЕНКО

Кубанский государственный университет, Краснодар

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЗАГЛУБЛЕННЫХ РАЗВЕТВИТЕЛЕЙ 1 × 8 В СТЕКЛЯННЫХ ПОДЛОЖКАХ

Представлена технология изготовления заглубленных интегрально-оптических разветвителей 1 × 8 в стеклянных подложках. Методом ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ была изготовлена структура разветвителя, которая была заглублена электростимулированной миграцией ионов Na^+ в стеклянную подложку при стимулирующем напряжении $U = 70 \text{ В}$, в течение 10 минут. Проведённые измерения показали, что диаметр выходных каналов составляет 9 мкм, а неравномерность деления света по каналам – 0, Б.

V.A. NIKITIN, V.V. SERDYUKOV, N.A. YAKOVENKO

Kuban State University, Krasnodar

DEVELOPMENT AND FABRICATION OF 1 × 8 BURIED SPLITTERS IN GLASS SUBSTRATES

The technology of fabricating embedded 1 × 8 integrated optical splitters in glass substrates is presented. Using $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ ion exchange method, a splitter structure was made, which was buried by electro-stimulated migration of Na^+ ions into a glass substrate at a stimulating voltage $U = 70 \text{ V}$ for 10 minutes. Measurements have been shown that diameter of the output channels is 9 μm , also the nonuniformity of light division between the channels is 0.4 dB.

Интегрально-оптические разветвители используются в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) и в пассивных оптических сетях (PON), обеспечивающих широкополосную передачу информации абонентам.

Целью работы было изготовление заглубленных интегрально-оптических разветвителей 1 × 8 в стеклянных подложках.

Интегрально-оптические заглубленные разветвители изготавливались в стеклянных подложках размером 50 × 20 × 1,25 мм.

На одну из сторон стеклянной подложки методом термовакuumного напыления наносился маскирующий слой алюминия толщиной 0,6 мкм.

Формирование рисунка разветвителя 1 × 8 на поверхности напылённого маскирующего алюминиевого слоя производилось с помощью установки безмасковой фотолитографии $\mu\text{PG-101}$, которая позволяла получить минимальный размер элемента 3 мкм по созданной в

AutoCAD программе. При проведении фотолитографии использовался позитивный фоторезист ФП-383, нанесённый методом центрифугирования при скорости вращения подложки 4000 об/мин.

Внешний вид подготовленной для ионного обмена стеклянной подложки с маскирующим слоем представлен на рис. 1.

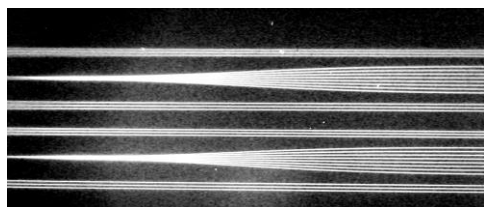


Рис. 1. Внешний вид отверстий в маскирующем слое

Подготовленная таким образом стеклянная подложка с маскирующим слоем помещалась в расплав солей $\text{AgNO}_3 + \text{NaNO}_3$, взятых в молярных соотношениях 1 : 200, при температуре 380 °С. В процессе ионного обмена $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$ ионы серебра внедрялись в стекло, и приводили к увеличению

показателя преломления в областях, не защищённых маскирующим слоем.

Ионный обмен проводился в течение 10 минут.

Заглубление интегрально-оптических разветвителей в стеклянную подложку производилось с помощью электростимулированной миграции ионов, что позволило придать волноводам круглую форму поперечного сечения и уменьшить коллоидную окраску, неизбежно возникающую при диффузии ионов серебра [1].

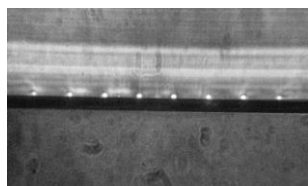


Рис. 2. Внешний вид выходного излучения

Процесс заглубления проводился в расплаве соли NaNO_3 , при $t = 380$ °С и стимулирующем напряжении $U = 70$ В, в течение 10 минут.

Внешний вид выходного излучения заглубленного интегрально-оптического разветвителя 1×8 представлен на рис. 2.

Проведённые измерения показали, что диаметр выходных каналов составляет 9 мкм, а неравномерность деления света по каналам – 0,4 дБ.

Список литературы

1. Векшин М.М., Никитин В.А., Яковенко Н.А. Измерение оптических потерь в заглубленных Ag^+ -волноводах в стекле К-8 // V Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2016. С. 331-332.

А.В. КОСЫРЕВ¹, Д.Д. РУЖИЦКАЯ¹,
П.В. КОРОЛЕНКО^{1,2}, Ю.В. РЫЖИКОВА¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва

ФРАКТАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОКЛАСТЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ С ДЕНДРИТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Разработаны новые алгоритмы формирования фрактальных дендритных кластеров. Найдены фрактальные характеристики объектов с дендритной структурой. Установлено взаимное соответствие между спектральными характеристиками дендритных объектов и их морфологическими особенностями структуры.

A.V. KOSYREV¹, D.D. RUZHITSKAYA¹,
P.V. KOROLENKO, Yu.V. RYZHIKOVA¹

¹Lomonosov Moscow State University

²Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

STABILITY ANALYSIS OF DENDRITIC TYPE SYSTEM CHARACTERISTICS

New algorithms for the formation of fractal dendritic clusters have been developed. Fractal characteristics of objects with a dendritic structure have been found. The mutual correspondence between the spectral characteristics of dendritic objects and their morphological features of the structure has been established.

Изучение объектов с дендритной структурой является перспективным направлением современной науки и техники [1 - 3]. В частности, они применяются: в биомедицине при диагностике различных заболеваний и разработке новых лекарственных веществ, для интерпретации процессов возникновения жизни на Земле, при исследовании особенностей структурирования нанообъектов в результате процесса самоорганизации.

Несмотря на большое количество работ в данной области [1 - 7], недостаточно изученными оказались вопросы, связанные с изучением фрактальных особенностей формирования дендритных структур со спонтанно образующимися центрами роста.

Цель настоящей работы состоит в разработке комплекса новых оригинальных алгоритмов и программ построения двумерных дендритов со спонтанно образующимися центрами роста в процессе их самоорганизации, который позволяет проводить расширенный анализ их морфологических особенностей.

Для дендритных структур количественная оценка самоподобных свойств проводилась на основе определения фрактальной размерности. В работе проводилась оценка размерности Минковского методом box-counting, а также массовой фрактальной размерности, как для смоделированного дендрита в целом, так и для отдельных его фрактальных кластеров. При этом анализировались зависимости фрактальной размерности дендритных образований от числа составляющих их частиц. Установлено взаимное соответствие между спектральными характеристиками дендритных объектов и их морфологическими особенностями.

Разработанная модель взаимодействия наночастиц даёт новые возможности целенаправленного влияния на особенности роста дендритов со стохастическими центрами роста, что может использоваться для описания процессов самоорганизации нанообъектов разной природы, в том числе имитации морфогенеза различных биологических систем.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 19-02-00540).

Список литературы

1. Canabal J.A., Otaduy M.A., Kim B., Echevarria J. // Eurographics. 2020. V. 39. No. 2. P. 1.
2. Nicolás-Carlock J.R., Carrillo-Estrada J.L., Dossetti V. // Scientific reports. 2016. V. 6. P. 19505.
3. Каретин Ю.А. / Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2017.
4. Рыжикова Ю.В., Ковальчук М.В., Короленко П.В., Косырев А.В. // Ученые записки физического факультета МГУ. 2020. № 4. С. 2040301.
5. Ружицкая Д.Д., Рыжикова Ю.В., Рыжиков С.Б. // Известия РАН. Серия физическая. 2018. № 11. С. 1512-1515.
6. Самсонов В.М., Кузнецова Ю.В., Дьякова Е.В. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 2. С. 71-77.
7. Логачев П.А., Ружицкая Д.Д., Рыжиков С.Б., Рыжикова Ю.В. // Сборник научных трудов VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М.: НИЯУ МИФИ. 2017. С. 144-145.

А.В. САРАФАННИКОВА¹, А.И. ГАРИФУЛЛИН¹,
Р.Х. ГАЙНУТДИНОВ^{1,2}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

²Институт перспективных исследований АН Республики Татарстан, Казань

РАСЧЁТ ЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ ПЛОСКИХ ВОЛН И МЕТОДОМ МАТРИЦ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

В этой работе производится расчёт дисперсионных соотношений для одномерного фотонного кристалла при нормальном падении излучения при помощи метода плоских волн, а также для падения под углом при помощи метода матриц переноса. Приводятся графики для диапазона частот видимого света.

A.V. SARAFANNIKOVA¹, A.I. GARIFULLIN¹,
R.H. GAINUTDINOV^{1,2}

¹Kazan Federal University

²Institute of Perspective Researches of Tatarstan Academy of Sciences, Kazan

CALCULATION OF ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL BAND STRUCTURE USING THE PLANE WAVES METHOD AND THE PROPAGATION MATRIX METHOD

In this work, the dispersion relations in a one-dimensional photonic crystal are calculated at normal incidence of radiation using the plane wave method, and also for incidence at an angle using the transfer matrices method. The graphs are given for the frequency range of visible light.

Одномерные фотонные кристаллы – материалы, обладающие множеством интересных свойств, так как они обладают узким спектром пропускания, что позволяет применять их для регистрации комбинационного рассеяния, или в качестве плоских волноводов [1].

Цель работы – вычислить дисперсионные соотношения, необходимые для создания фотонного кристалла, соответствующего нуждам. Для расчёта дисперсионных соотношений в фотонном кристалле при нормальном падении излучения будет использован метод плоских волн. Зонная структура, полученная при помощи этого метода [2], хорошо согласуется с экспериментальными данными. При допущении, что каждый слой фотонного кристалла однороден, а все границы раздела представляют собой параллельные плоскости в этом методе используется

теорема Блоха. При помощи неё необходимо разложить вектор напряжённости магнитного поля по плоским волнам. Для этого необходима периодическая функция, в роли которой выступит обратная диэлектрическая проницаемость, разложенная в ряд Фурье. Вычисляя различное количество компонент, можно получить различную точность и пронаблюдать запрещённые зоны в фотонном кристалле [3, 4]. В этой работе рассчитаны дисперсионные соотношения и соотношения для 2 и 10 компонент магнитного поля. При помощи этого метода возможно построить трёхмерные графики дисперсионных соотношений, но для этого требуются большие вычислительные мощности, поэтому будем рассматривать только компоненту k_z . В распределении компонент магнитного поля можно отметить возникновение стоячих волн между попарными компонентами на границах зон Бриллюэна ($k_z = \pm n\pi/2$, где n – целое число), что приводит к образованию фотонных запрещённых зон при данных значениях k_z .

Чтобы рассмотреть падение света под некоторым углом, будет применён метод матриц распространения. При рассмотрении фотонного кристалла в этом методе учитываются все три компоненты волнового вектора. В [5] описан вывод трансцендентного уравнения, с помощью которого вычислены дисперсионные соотношения в данной работе.

В данной работе были рассмотрены два случая распространения света:

1) свет падает на фотонный кристалл перпендикулярно его поверхности, дисперсионное соотношение зависит только от k_z компоненты волнового вектора k ;

2) свет падает под некоторым углом, в этом случае учитывается компонента k_x .

Для нормального падения излучения на поверхность фотонного кристалла производится вычисление дисперсионного соотношения только для компонент магнитного поля, так как при нормальном падении ТЕ и ТМ поляризации неразличимы. Во втором случае необходимо вычислять дисперсионное соотношение для каждой поляризации. При $k_x = 10^5 \text{ м}^{-1}$, ширина запрещённых зон уменьшается, что согласуется с теорией.

Список литературы

1. Кособукин В.А. // Окно в микромир. 2002. № 4. С. 4-9.
2. Белотелов В. И., Звездин А.К. // Квант. 2006. № 2. С.15-18.
3. Дегтяренко Н.Н., Каргин Н.И. Введение в физику и моделирование фотонных кристаллов. Учебное пособие. Москва: МИФИ, 2012.
4. Нурлигареев Д.Х., Сычугов В.А. //Квант. электроника. 2008. Т. 38. № 5. С. 452-461.
5. Skorobogatiy M., Yang J. Fundamentals of photonic crystal guiding. Cambridge University Press, 2009.

И.В. МИНИН, О.В. МИНИН
Томский политехнический университет

ФОТОННЫЙ КРЮЧОК: НОВЫЙ СУБВОЛНОВОЙ СТРУКТУРИРОВАННЫЙ САМОИЗГИБАЮЩИЙСЯ ВОЛНОВОЙ ПУЧОК

В течение нескольких последних лет было обнаружено, что электромагнитное поле можно заставить искривляться после распространения через простой диэлектрический материал особой формы (как внутренней, так и внешней). Этот эффект был назван «фотонными крючками» - это уникальная электромагнитная структурированная конфигурация пучка за мезомасштабной диэлектрической частицей с нарушенной симметрией, отличающаяся от пучков семейства Эйри. Фотонные крючки имеют радиус кривизны, который примерно в 2 раза меньше длины электромагнитной волны – это наименьший радиус кривизны электромагнитных волн, о котором когда-либо сообщалось.

I. V. MININ, O. V. MININ
National Research Tomsk Polytechnic University

PHOTONIC HOOK: A NEW SUBWAVELENGTH-SCALE STRUCTURED SELF-BENDING LIGHT BEAM

During several last years it was discovered that an electromagnetic field can be made to curve after propagation through a simple dielectric material of special shape (both internal and external), which adds a new-found degree of simplicity. This effect was termed 'photonic hooks' – it is a unique electromagnetic structured beam configuration behind a mesoscale dielectric particle with a broken symmetry and differ from Airy-family beams. Photonic hooks features the radius of curvature, which is about 2 times smaller than the electromagnetic wavelength - this is the smallest curvature radius of electromagnetic waves ever reported.

В данной работе мы рассматриваем принципы формирования нового класса субволновых самоизгибающихся структурированных световых пучков, открытых нами в 2015 году и основанных на дифракции на мезомасштабных диэлектрических Янус-частицах [1]. Свет фотонного крючка (PH) не распространяется по прямой линии, а вместо этого следует изогнутой траектории. Анализ волнового фронта такой асимметричной мезомасштабной структуры показывает, что неравномерная фаза прошедшей плоской волны приводит к нерегулярно вогнутой деформации волнового фронта внутри структуры, которая затем

и приводит к созданию РН. Отличительной особенностью РН являются [1-6]: как поперечный размер области локализации поля, так и радиус кривизны РН являются субволновыми. Более того, отсутствуют искривлённые боковые лепестки в области локализации поля по сравнению с пучками типа Эйри [1, 3, 4], в которых боковые лепестки почти параллельны друг другу. Важно, что в РН есть перегиб, при котором изогнутый луч меняет направление своего распространения. Этим свойством не обладают лучи семейства Эйри, которые не характеризуются криволинейной траекторией распространения их центра тяжести, как у фотонного крючка.

Характеристики изогнутых пучков ближнего поля, в зависимости от конкретного применения, могут быть довольно экзотическими, например, в виде субволновой фотонной петли [5, 7] из-за управления фазовыми задержками по фронту волны путем выбора формы мезомасштабные частицы. Интересный и простой механизм формирования фотонного крючка основан на мезомасштабном диэлектрическом цилиндре с регулируемой подсветкой и площадью. Также для генерации РН были предложены и исследованы диэлектрические частицы с нарушенной симметрией, состоящие из материалов с разными показателями преломления [5].

В недавних работах показана возможность реализации РН, включая оптику [1, 2], ТГц [3], поверхностными плазмонами [8], акустику [9] и в целом ускорили развитие мезомасштабной фотоники. Предложена концепция лазерного скальпеля с искривлённым «лезвием» [10]. В исследованиях захвата наночастиц эти исследования привели к концепции оптомеханического манипулятора на основе фотонного крюка, который позволяет осуществить перемещение наночастиц по искривленной траектории даже вокруг диэлектрических препятствий [6].

Работа частично поддержана грантом РФФИ (грант № 20-57-S52001).

Список литературы

1. Minin I.V., Minin O.V. *Diffraction Optics and Nanophotonics*. Springer, 2016.
2. Yue L., et al. // *Opt. Lett.* 2018. V. 43. P. 771-775.
3. Minin I.V., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 114. P. 031105-1-031105-5.
4. Minin I.V., et al. // *Opt. Lett.* 2020. V. 45. P. 3244-3247.
5. Minin I.V., et al. // *Opt. Lett.* 2020. V. 45. P. 4899-4902.
6. Ang A., et al. // *Sci. Rep.* 2018. V. 2. P. 2029.
7. Minin I.V., et al. // *Opt. Express.* 2020. V. 28. P. 22690-22704.
8. Minin I.V., et al. // *Ann. Phys.* 2018. V. 530. P. 1800359.
9. Rubio C., et al. // *Results in Physics.* 2020. V. 16. P. 102921-10926.
10. Minin I.V., et al. // *J. Biophotonics.* 2020. P. e202000342.

А.А. ГОШЕВ, М.К. ЕСЕЕВ, Д.Н. МАКАРОВ

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,
Архангельск***ВТОРАЯ ГАРМОНИКА В СПЕКТРЕ РАССЕЯНИЯ
УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ НА УГЛЕРОДНЫХ
НАНОМАТЕРИАЛАХ**

В работе приведены результаты расчёта взаимодействия ультракороткого импульса (УКИ) с углеродными нанообъектами типа: углеродная нанотрубка, лист графена, группа колец на плоскости и др. Получено общее выражение для спектра рассеяния УКИ. Взаимодействие с мишенью считается внезапным, учитывается магнитная составляющая налетающего импульса, которая приводит к генерации второй гармоники в спектре рассеяния.

A.A. GOSHEV, M.K. ESEEV, D.N. MAKAROV

*Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk***SECOND HARMONIC IN THE SCATTERING SPECTRUM
OF ULTRA-SHORT PULSES BY CARBON NANOMATERIALS**

The paper presents the results of calculating the interaction of an ultrashort pulse with carbon nanoobjects of the type: carbon nanotube, graphene sheet, group of rings on a plane, etc. A general expression is obtained for the scattering spectrum of ultrashort pulses. The interaction with the target is considered sudden, taking into account the magnetic component of the incident pulse, which leads to the generation of the second harmonic in the scattering spectrum.

Спектроскопические методы исследования являются на сегодняшний день одними из самых информативных физико-химических методов контроля структуры и качества материалов. В этом смысле УКИ могут дополнить список этих методов как высокоточный и дефекточувствительный метод.

Работая в рамках метода внезапных возмущений [1] (длительность УКИ много меньше характерного атомного времени) и основываясь в основном на результатах работ [1-3]. Авторы приводят расчёт спектра рассеяния УКИ.

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega_{\mathbf{k}}} = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{c^3 \omega} (N_a N_e G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) + \delta_N(\mathbf{p}) N_e (N_e - 1) F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)), \quad (1)$$

где N_a - общее число атомов в системе, N_e - число электронов в атоме, $G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ и $F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ средние величины, выраженные через электронную плотность. В спектре рассеяния в предельных случаях можно выделить как некогерентную, так и когерентную часть спектра. За пространственное расположение атомов и дифракционную картину ответственен фактор $\delta_N(\mathbf{p})$ в выражении (1). В области низких частот ($\omega_0 / c < 1$) в спектре рассеяния отчётливо виден вклад фактора $\delta_N(\mathbf{p})$. В высокочастотной области направление рассеяния в основном совпадает с направлением падения УКИ. На рис. 1 приведён спектр рассеяния УКИ на углеродной нанотрубке в приближении группы аксиально симметричных колец.

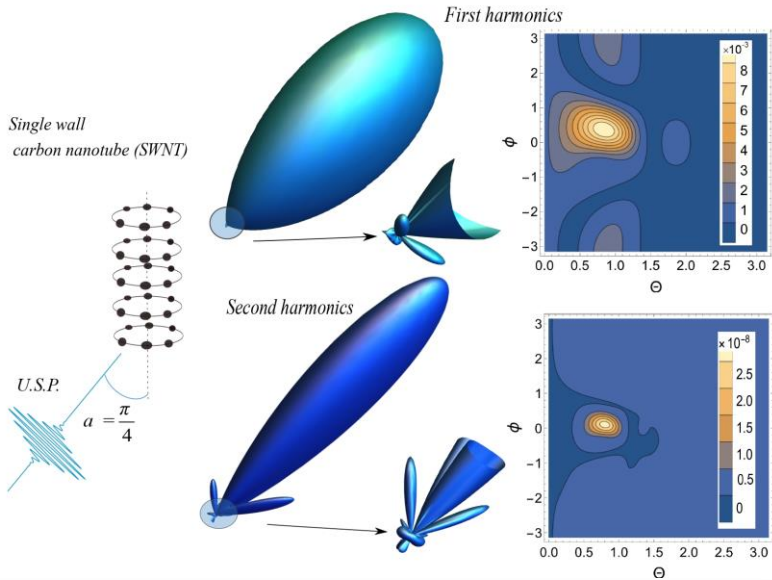


Рис. 1. 3D диаграмма направленности и контурный график направленности рассеяния УКИ с частотой $\omega_0 = 100$ а.е. и амплитудой $E_0 = 1000$ а.е. на однослойной углеродной нанотрубке, число атомов в кольце $N = 6$, радиус кольца $R = 4$ а.е., число колец $N = 8$, расстояние между кольцами $d = 2$ а.е. на первой и второй гармониках

Список литературы

1. Matveev V.I. // J. Exp. Theor. Phys. 2003. V. 97 (5). P. 915.
2. Matveev V.I., Makarov D.N. // JETP Letters. 2016. V. 103(4). P. 286.
3. Eseev M.N., Goshev A.A., Makarov D.N. // Nanomaterials, 2020. V. 10(7). P. 1355.

В.А. ХАЛЯПИН^{1,2}, А.Н. БУГАЙ³¹Калининградский государственный технический университет²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград³Объединенный институт ядерных исследований, Дубна**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ФИЛАМЕНТОВ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В РЕЖИМЕ ИОНИЗАЦИИ**

Проведено аналитическое исследование динамики филаментов, распространяющихся в среде с фотоионизацией и найдено стационарное решение. С помощью метода Ляпунова получен критерий устойчивого распространения.

V.A. KHALYAPIN^{1,2}, A.N. BUGAY³¹Kaliningrad State Technical University²Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad³Joint Institute of Nuclear Researches, Dubna**ON THE STABILITY OF OPTICAL FILAMENTS
PROPAGATION IN THE IONIZATION REGIME**

An analytical study of the filament's dynamics in a medium with photoionization is carried out and stationary solution was obtained. Using the Lyapunov method, a stability criterion for such filaments is obtained.

В настоящей работе предложен подход описания динамики филаментов, распространяющихся в планарном волноводе при учёте ионизации. Соответствующее уравнение имеет вид

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} - i\gamma\psi|\psi|^2 + i\eta N_e\psi - \frac{i\mu}{2}\Delta_{\perp}\psi + M\psi + \Phi\frac{W}{|\psi|^2}\psi = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = W(N_0 - N_e) - \beta N_e^2. \quad (2)$$

Здесь ψ – медленно меняющаяся огибающая, z – ось, вдоль которой распространяется сигнал, скорость импульса на его центральной частоте ω , η , σ – коэффициенты, характеризующие ионизацию [1], $\mu = c/n_0\omega$, n_0 – показатель преломления среды на нулевой частоте, N_0 – число неионизированных атомов, γ – коэффициент кубической нелинейности,

M – определяет поглощение энергии электромагнитного поля за счёт столкновения электронов с атомами, Φ – характеризует потери энергии поля на ионизацию, W – степень ионизации, β – коэффициент рекомбинации электронов. Равновесное значение числа электронов определяется из (2)

$$N_{eq} = \sqrt{\frac{cn_0 N_0 \sigma W}{8\pi\beta}}. \quad (3)$$

Анализ динамики параметров сигнала проводился на основе метода моментов [2] с пробной функцией

$$\psi = B \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + i \left(\phi - \frac{\varepsilon r^2}{2R^2} \right) \right], \quad (4)$$

где B – амплитуда сигнала, R – параметр, пропорциональный радиусу сигнала, ε – описывает кривизну волновых поверхностей. Все параметры зависят от координаты z . Была получена система уравнений на параметры филамента. Зануляя производные от параметров, мы получили стационарное решение для радиуса и амплитуды сигнала. Далее нами был проведён анализ устойчивости стационарного решения по методу Ляпунова и получен аналитический критерий на параметры филамента. Следует отметить, что критерий устойчивости получен без учёта поглощения, вклад которого приведет к тому, что динамика пучка будет иметь квазиустойчивый характер.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-02-00234а).

Список литературы

1. Saleh M.F., Chang W., Holzer P., Nazarkin A., Travers J.C., Joly N.Y., Russell P.St.J., Biancalana F. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 107. P. 203902.
2. Santhanam J. // Opt. Commun. 2003. V. 222. P. 413-420.

Н.И. ПЕТРОВ, В.И. ПУСТОВОЙТ

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР
С РЕЗОНАТОРАМИ ФАБРИ-ПЕРО В КАЧЕСТВЕ
ОТРАЖАЮЩИХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН**

Предложен метод обнаружения гравитационных волн, основанный на регистрации корреляционной функции для интенсивностей излучения резонансных мод ненулевого порядка от двух плеч интерферометра Майкельсона с резонаторами Фабри-Перо.

N.I. PETROV, V.I. PUSTOVOIT

Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

**SMALL-SIZED INTERFEROMETER WITH FABRY-PEROT
RESONATORS AS REFLECTING MIRRORS FOR DETECTING
GRAVITATIONAL WAVES**

A method for detecting gravitational waves is proposed based on the registration of the correlation function of the radiation intensities of non-zero-order resonant modes from the two arms of the Michelson interferometer with Fabry-Perot resonators.

Идея использования лазерных интерферометров для регистрации гравитационных волн впервые была высказана в 1962 году в работе [1], где был предложен новый метод регистрации гравитационных волн, основанный на использовании лазерного интерферометра. В 2015 году эти волны были экспериментально обнаружены двумя детекторами лазерной интерференционной гравитационно-волновой обсерватории (LIGO) в Хэнфорде и Ливингстоне (США) [2, 3]. Подробный анализ современного состояния проблемы приведён в обзоре [4].

В настоящей работе показана возможность создания лазерного интерферометра с распределёнными зеркалами для регистрации гравитационных волн в лабораторных условиях. В качестве отражающих зеркал, образующих оптический интерферометр Фабри-Перо, предлагается использовать отражающие периодические структуры, имеющие экспоненциально узкую полосу пропускания лазерного излучения [5, 6]. Показано, что спектральное разрешение 10^{-23} см^{-1} может

быть достигнуто при расстоянии между зеркалами всего 1 - 3 м. Исследовано также влияние поглощения света в кристаллах на предельное разрешение таких резонаторов. Предложен метод, основанный на измерении корреляционной функции интенсивности резонансных мод ненулевого порядка от двух плеч интерферометра Майкельсона, чувствительность которого превышает чувствительность системы LIGO. Общая форма передаточной функции показана на рис. 1. Как видно из рис. 1, изменение расстояния между зеркалами влечёт за собой изменение спектра пропускания интерферометра: расстояние между максимумами изменяется вследствие сдвига частоты резонансных мод ненулевого порядка. Отметим, что сдвиг пиков увеличивается с порядком моды.

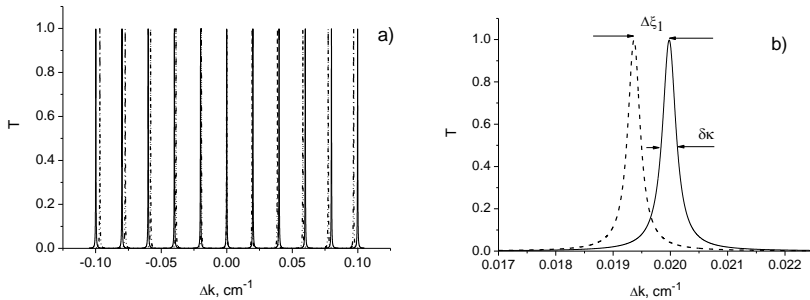


Рис. 1. Кривые пропускания в зависимости от расстройки Δk : набор пиков от двух плеч интерферометра Майкельсона с различными расстояниями между зеркалами (а); пики, соответствующие моде 1-го порядка для расстояний d и $d + \Delta d$, $d = 100\pi$ см, $L = 0.75$ см, $\lambda = 0.63$ мкм (б)

Показано, что использование резонаторов Фабри-Перо с периодическими структурами в качестве отражающих зеркал позволяет значительно уменьшить размеры системы (расстояние между зеркалами может составлять всего несколько метров). Чувствительность такого интерферометра при малых перемещениях зеркал относительно друг друга превышает чувствительность системы LIGO

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-11026.

Список литературы

1. Герценштейн М.Е., Пустовойт В.И. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 605-607.
2. Abbott B.P., et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 16. P. 061102.
3. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 241103.
4. Pustovoit V.I. // Phys. Usp. 2016. V. 59. P. 1034-1051.
5. Petrov N.I., Pustovoit V.I. // Laser Physics Letters. 2017. V. 14. No. 11. P. 115702.
6. Petrov N.I., Pustovoit V.I. // JETP Lett. 2019. V. 109. P. 18-23.

В.М. КОТОВ, С.В. АВЕРИН

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

ДВУХЦВЕТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ С ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ, ВРАЩАЮЩИМИСЯ В ПРОТИВОПОЛОЖНЫЕ СТОРОНЫ

Рассмотрен способ формирования двухцветного излучения с поляризациями монохроматических компонент, вращающимися в противоположные стороны. Способ основан на акустооптической (АО) дифракции двухцветного излучения на одной акустической волне в двух гиротропных кристаллах и сложении взаимноортогональных циркулярных поляризаций. Метод продемонстрирован на примере излучения лазера, генерирующего на длинах волн 0.488 и 0.514 мкм, с использованием двух АО ячеек из TeO_2 , работающих на частоте звука 60 МГц.

V.M. KOTOV, S.V. AVERIN

Fryazino Branch of Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of the RAS

TWO-COLOR RADIATION WITH THE POLARIZATION ROTATING IN OPPOSITE DIRECTIONS

It is considered a method of the forming the two-color radiation with the polarization of the mono chromatic components rotating in opposite directions. The method is based on the acousto-optic (AO) Bragg diffraction of two-color radiation on a single acoustic wave in gyro tropic crystal and on superposition of two orthogonal circular polarizations. The method is demonstrated with the involving of the Ar laser generating two lines with the wavelengths 0.488 and 0.514 μm and two AO cells from TeO_2 operating at the acoustic frequency 60 MHz.

Для ряда прикладных задач (двухкоординатной лазерной анемометрии, оптической гироскопии, двухцветной поляриметрии и т.д.) необходимо использовать двухцветное оптическое излучение с поляризациями компонент, вращающимися в противоположные стороны. В настоящей работе для формирования такого излучения предлагается способ, который поясняется с помощью рис. 1.

Линейно поляризованное двухцветное излучение с длинами волн λ_1 и λ_2 проходит через акустооптическую (АО) ячейку АО-1, при этом каждая монохроматическая компонента распадается в ней на две собственные циркулярно-поляризованные волны. В дифракции участвует только одна из собственных волн каждой компоненты. В результате АО дифракции компонента с длиной волны λ_1 отклоняется по одну сторону от падающего

излучения, приобретая при этом частоту $(\omega_1 + \Omega)$. Излучение с длиной волны λ_2 отклоняется по другую сторону, её частота станет $(\omega_2 - \Omega)$. Здесь ω_1 и ω_2 – частоты лучей с длинами волн λ_1 и λ_2 , Ω – частота звука. После прохождения через ячейку АО-2 дифрагировавшие лучи возвращаются в основной луч, однако сдвиг частоты каждого из дифрагировавших лучей увеличится ещё на величину Ω , поскольку акустическая волна во второй ячейке противоположна волне первой ячейки.

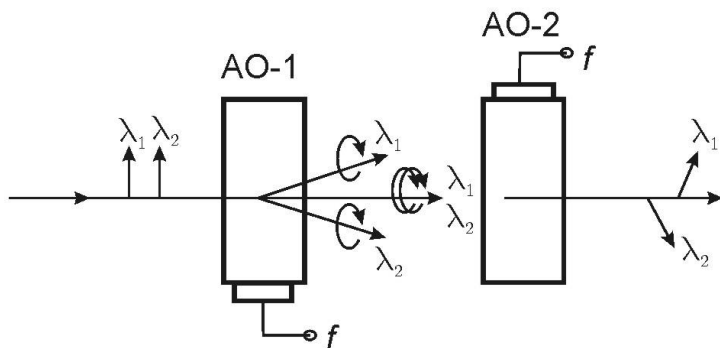


Рис. 1. Оптическая схема предлагаемого способа

Таким образом, на выходе двух ячеек интерферируют циркулярные волны с частотами ω_1 и $(\omega_1 + 2\Omega)$, а так же волны с частотами ω_2 и $(\omega_2 - 2\Omega)$. Сложение таких волн приводит к образованию линейно-поляризованных волн, вращающихся в противоположные стороны [1].

Метод проверен на примере излучения аргонового лазера, генерирующего на длинах волн $\lambda_1 = 0.488$ и $\lambda_2 = 0.514$ мкм, и использованием двух АО ячеек из TeO_2 , работающих на частоте звука 60 МГц.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0030-2019-0014, а так же при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-07-00071).

Список литературы

1. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967.

И.А. ИСМАИЛОВ

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

УПРАВЛЕНИЕ ОРБИТАЛЬНЫМ УГЛОВЫМ МОМЕНТОМ СВЕТОВЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

Акустооптическое взаимодействие в оптическом волокне исследуется с точки зрения совместного распространения оптических и акустических вихревых мод. Показано, что орбитальный угловой момент акустического вихря может быть передан основной оптической моде с круговой поляризацией, чтобы сформировать устойчивый оптический вихрь в волокне, несущем орбитальный угловой момент. Этот метод обеспечивает один из способов создания устойчивых оптических вихрей в оптическом волокне.

I.A. ISMAILOV

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

CONTROLLING THE ORBITAL ANGULAR MOMENTUM OF LIGHT BEAMS USING OPTICAL FIBERS

Acousto-optic interaction in optical fiber is examined from the perspective of copropagating optical and acoustic vortex modes. We show that the orbital angular momentum of the acoustic vortex can be transferred to a circularly polarized fundamental optical mode to form a stable optical vortex in the fiber carrying orbital angular momentum.

При акустооптическом взаимодействии акустическая волна изменяет показатель преломления за счёт упруго-оптического эффекта, приводя к связи между оптическими модами. Это взаимодействие также можно рассматривать как процесс фотон-фононного рассеяния, в котором сохраняются полная энергия и импульс частиц [1]. Угловой момент – ещё одна физическая величина, которую необходимо сохранить при этом взаимодействии. Фононы не несут собственного спинового углового момента (СУМ). Однако фононы могут нести орбитальный угловой момент (ОУМ), образуя вихри в среде, в которую они распространяют.

Целью является рассмотрения акустооптического взаимодействия в оптическом волокне. Генератор сигнала акустической волны (рис. 1) подаётся на пьезоэлектрический преобразователь (PZT). Акустические волны, генерируемые PZT, передаются на волокно через алюминиевый

рупор. Длина двенадцатимодового волокна, с диаметром сердцевины 10 мкм и оболочки 125 мкм, составляет около 12 см. Длина волны лазера 632 нм. Частота PZT возбуждения составила 1152 кГц. В интерференции чётко наблюдались «вилки» (рис. 2), которые показывают существование вихревой моды. Это подтверждает передачу ОУМ от акустических вихрей к оптическим вихрям в волокне. Следует отметить, что этот тип связи мод также возможен с использованием двух наклонных длиннопериодных решёток соответствующим фазовым сдвигом.

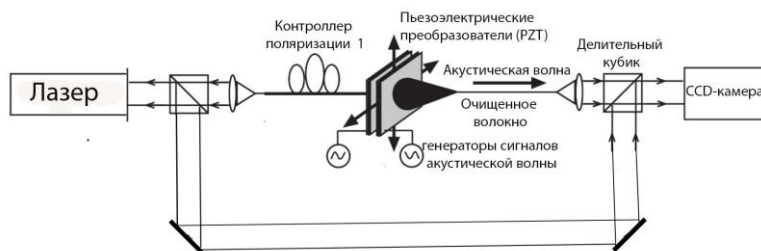


Рис. 1. Экспериментальная установка

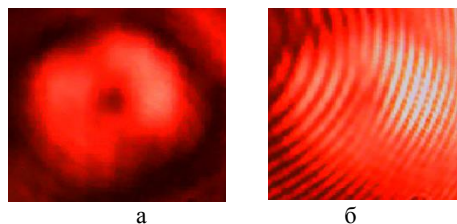


Рис. 2. Картина интенсивности вихря первого порядка (а), «вилка» показывает особую точку несущий топологический заряд единицы (б)

Таким образом, проанализирована и подтверждена генерация оптического вихря, несущего орбитальный угловой момент, непосредственно в волокне. Это достигается за счёт передачи ОУМ от акустического вихря, генерируемого в волокне. Анализ коэффициента связи этого акустооптического взаимодействия подтверждает независимое сохранение спинового и орбитального угловых моментов.

Список литературы

1. Erdogan T. // J. Lightwave Technol. 1997). V. 15. P. 1277.

И.О. ВЕНЕДИКТОВ¹, М.С. ЕЛЕЗОВ¹, А.И. ПРОХОДЦОВ^{1,2},
В.В. КОВАЛЮК^{1,3}, П.П. АН^{1,3}, А.Д. ГОЛИКОВ¹,
М.Л. ЩЕРБАТЕНКО¹, Д.В. СЫЧ^{1,4,5}, Г.Н. ГОЛЬЦМАН^{1,2}

¹Московский педагогический государственный университет

²Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",
Москва

³Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского
ФИЦ «Казанский научный центр РАН»

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

⁵ООО «QRate», Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ МОДУЛЯТОРОВ НА ТЕРМООПТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ ДЛЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА НА ЧИПЕ

Приведены результаты измерений оптической мощности на выходе перестраиваемого интерферометра на чипе при подаче напряжения на микронагреватели, выступающие в роли фазовых модуляторов. Определены пороговые напряжения микронагревателей, найдены калибровочные зависимости модулированной фазы от подаваемого на один микронагреватель напряжения.

I.O. VENEDIKTOV¹, M.S. ELEZOV¹, A.I. PROHODTSOV^{1,2},
V.V. KOVALYUK^{1,3}, P.P. AN^{1,3}, A.D. GOLIKOV¹,
M.L. SHCHERBATENKO¹, D.V. SYCH^{1,4,5}, G.N. GOLTSMAN^{1,2}

¹Moscow State Pedagogical University

²National Research University Higher School of Economics, Moscow

³Zavoisky Physical-Technical Institute, FRC Kazan Scientific Center of the RAS

⁴Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow

⁵JCS «QRate», Skolkovo, Moscow region

USING OF TERMOOPTIC EFFECT BASED PHASE MODULATORS FOR TUNABLE INTERFEROMETER ON CHIP

Presented results of measurements of dependence of optical power on output of interferometer on voltage applied to microheaters, which used as phase modulators. Measured burn out voltages of microheaters, obtained phase-voltage dependence for each microheater.

Перестраиваемый интерферометр на чипе может быть использован как самостоятельный прибор, а также как элемент интегральной оптики при

реализации оптимального приёмника слабых оптических сигналов [1], который может быть использовано в квантовой коммуникации.

Данный составной интерферометр состоит из трёх интерферометров Маха-Цендера: основного интерферометра и двух интерферометров на его плечах. Управление осуществляется при помощи фазовых модуляторов, работающих на термооптическом эффекте и реализованных в виде микронагревателей. Всего есть четыре фазовых модулятора и один микронагреватель, выступающий в роли светоделиителя на выходах интерферометра. Ввод излучения происходит при помощи каплеров. Чип представляет из себя пластинку из кремния с волноводами из нитрида кремния [2] и золотыми микронагревателями (рис. 1).

Для управления данным интерферометром нужно знать зависимость модулированной фазы от подаваемого напряжения. Для измерения этой зависимости на входы интерферометра при помощи массива волокон заводилось излучение с длиной волны 1596 нм, одновременно с этим на каждый из микронагревателей (отдельно) при помощи многоконтактного зонда и программируемого источника питания PWS4323 подавалось постоянное напряжение. Одновременно при помощи прибора Ophir Vega измерялась выходная оптическая мощность.

Таким образом, была получена зависимость фазы от напряжения (рис. 2), максимальное допустимое напряжение для подачи на микронагреватели (8 V). Выяснено, что для перестройки фазы на π необходимо напряжение около 7 V.

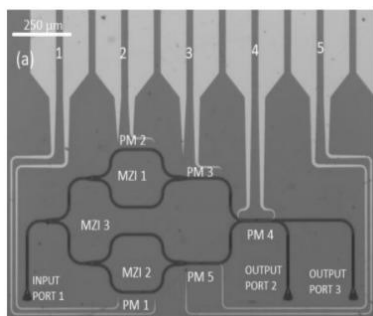


Рис. 1. Изображение интерферометра

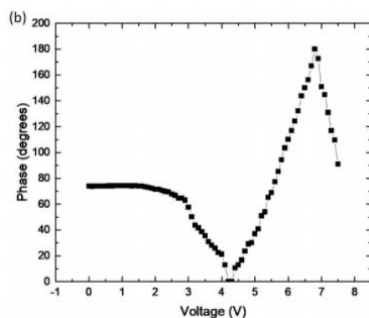


Рис. 2. Зависимость фазы от напряжения

Список литературы

1. Shcherbatenko M.L., Elezov M.S., Sych D.V., Goltsman G.N. // Phys Rev A. 2020. 101.
2. Ovyayan A.P., Gruhler N., Ferrari S., Pernice W.H.P. // J. Opt. 2016. 18/

К.М. БУЛАТОВ¹, Н.А. ХРАМОВ, П.А. НОСОВ, П.В. ЗИНИН¹
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБРАЗЦОВ С НЕИЗВЕСТНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ

Проведены измерения распределения температуры при помощи восьмиканальной мультиспектральной камеры с целью исследования флуктуаций температуры на поверхности исследуемого объекта при фазовых переходах, которые происходят при высоких давлениях и температурах.

K.M. BULATOV¹, N.A. KHRAMOV, P.A. NOSOV, P.V. ZININ¹
Bauman Moscow State Technical University
¹Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of RAS, Moscow

MULTI-SPECTRAL MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF SAMPLES WITH UNKNOWN RADIATIVE CAPACITY

Measurements of the temperature distribution were carried out using an 8-channel multispectral camera in order to study temperature fluctuations on the surface of the object under study during phase transitions that occur at high pressures and temperatures.

Доступность мощных импульсных лазеров приводит к развитию технологий, основанных на лазерном нагреве. Они используются при лазерной обработке деталей и плёнок. При лазерном нагреве требуется знать распределение температуры на поверхности образца. Двойной акустооптический фильтр (ТАОФ) можно использовать в сочетании с монохромной камерой [1, 2] для измерения распределения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. Преимущество ТАОФ – это возможность измерения абсолютного распределения температуры с погрешностью менее 3 %. Недостаток данного метода заключается в том, что ему необходимо время (~ 1 с) на регистрацию гиперспектра. За это время в быстропротекающих процессах возможно изменение условий эксперимента. В свою очередь яркостной метод лишён этих недостатков, но даёт большую погрешность при измерении температуры объекта с неизвестной излучательной способностью [2].

Поэтому нами был предложен и апробирован метод измерения температуры при помощи мультиспектральной камеры. Измерение температуры проводится методом мультиспектральных изображений теплового излучения нагретой области объекта. Для каждого пикселя изображения осуществляется подборка таких параметров ε и T , при которых сумма квадратов отклонений минимальна.

Были проведены исследования возможности использования мультиспектральной камеры для измерения распределения температуры лампы с неизвестной излучательной способностью. Обработка результатов измерений проводилась методом наименьших квадратов.

Изображение получается с помощью оптической системы микроскопа, включающая в себя объектив 10^{\times} с коррекцией на бесконечность с большим рабочим расстоянием, эталонный источник света в виде ленточной лампы Сиб-100, объектив с фокусным расстоянием 400 мм и мультиспектральная камера Silios (QE_CMS-V1-C-EVR1M-USB3). Температура измеряемого образца изменяется от источника постоянного тока.

После регистрации спектра и сравнения его с распределением Планка находится температура тела и излучательная способность путем минимизации ошибки по 8-ми каналам. Это позволило получить распределение температуры нагретой ленты лампы при различных значениях силы тока. Для проверки достоверности полученных данных была рассчитана максимальная температура используемого эталонного источника света по яркостному методу.

В результате сравнения максимальной температуры, полученной рассмотренным и яркостным методами, можно сделать вывод о том, что рассмотренный в работе метод позволяет измерять распределение температуры нагретого образца с неизвестной излучательной способностью.

Список литературы

1. Bulatov K.M., Mantrova Yu.V., Bykov A.A., Gaponov M., Zinin P.V., Machikhin A.S., Trojan I.A., Batshev V I., Kutuzo I.B. Multi-spectral image processing for the measurement of a spatial temperature distribution on the surface of a laser-heated microscopic object // КО. 2017. V. 41 (6). P. 864-868.
2. Zinin P.V. // Н. П. Res. 2019. P. 1477-2299.

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
 Московский завод «САПФИР», Москва

ПРИБОР НОЧНОГО ВИДЕНИЯ С ТЕПЛОБНАРУЖИТЕЛЕМ

Рассматривается прибор ночного видения (ПНВ), оснащённый теплообнаружителем, обеспечивающего поиск теплоизлучающего объекта и создающим его точечное изображение, наблюдаемое оператором в окуляр ПНВ и сторонними наблюдателями невооружённым глазом

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
 JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

NIGHT VISION DEVICE WITH HEAT DETECTOR

Seen night vision device (NVD) fitted with heat detector that searches of the radiant object and creates a bitmap image observed by the operator in the eyepiece of night vision and observers with the naked eye

ПНВ. нередко оснащаются теплообнаружителем (ТПО) для поиска и обнаружения теплоизлучающих объектов [1]. Блок схема такого устройства представлена на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2.

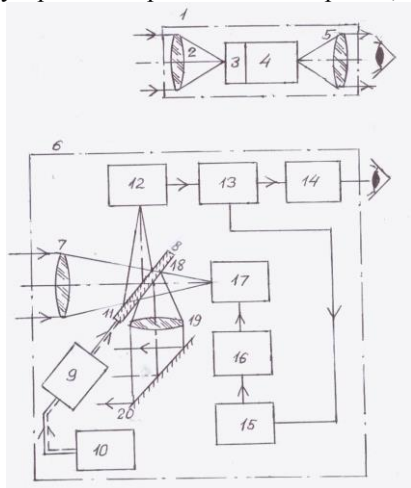


Рис. 1. Блок-схема ПНВ с ТПО



Рис. 2. Внешний вид ПНВ с ТПО

Объектив 2 ночного канала 1 создает ночное изображение местности на прицельной марке 3, совпадающей с фотокатодом электронно-оптического преобразователя (ЭОП) 4. ЭОП 4 преобразует изображение в видимое и усиливает его по яркости. Оно наблюдается правым глазом через окуляр 5. Тепловое излучение от объекта приходит в канал ТПО 6. Его ИК-объектив 7 направляет на отражающую поверхность 11 сканирующего зеркала 8 и далее в фокальную плоскость ИК-объектива 7, где установлено фотоприёмное устройство (ФПУ) 12, работающее в области спектра 8 - 14 мкм. В линейке фотоприёмников ФПУ 12 осуществляется строчная развёртка ИК-изображения, а его кадровая развёртка – с помощью зеркала 8, сканирующее через электромагнитный привод 9 от двигателя 10. ФПУ 12 преобразует ИК-изображение в электрический сигнал. Он обрабатывается в блоке электронной обработки (БЭО) 13. Если ФПУ 12 зарегистрировал теплоизлучающий объект, то на выходе БЭО 13 формируется электрический сигнал, который передаётся в светодиодный индикатор (СДИ) 14. Он светится красным светом там, где появилось «точечное» изображение объекта, что говорит о его обнаружении. Одновременно наблюдается правым глазом жёлто-зелёное изображение местности, (цвет свечения люминофора экрана ЭОП 4), а левым глазом – свечение красной точки СДИ 14. Мозг совмещает оба эти изображения, формируя единую картину – красная точка на жёлто-зелёном фоне изображения местности. Т.к. зеркало 8 сканирует с частотой 5 Гц, то и индикатор 14 работает с той же частотой, т.е. имеем мелькающее изображение красной точки для более надежного обнаружения объекта. При наличии сигнала он со второго выхода БЭО 13 поступает в пороговое устройство 15. Если сигнал выше некоторого порогового уровня, то на выходе порогового устройства 15 формируется сигнал, запускающий блок накачки 16. Он формирует импульсы тока, поступающие на ИЛПИ 17. Его излучение отражается от второй поверхности 18 зеркала 8 и приходит в ОФИ 19. Он коллимирует излучение ИЛПИ 17 и направляет на обзорное плоское зеркало 20. Излучение, отражённое от него, направляется на объект, создавая на нем «точечное» пятно подсвета. Поскольку ИЛПИ 17 излучает на длине волны 0,53 мкм или 0,63 мкм, то его излучение видно невооружённым глазом сторонних операторов и наблюдается в ночной канал 1, т.к. фотокатод ЭОП 4 работает в области спектра 0,4 - 0,9 мкм.

Список литературы

1. Волков В.Г., Гиндин П.Д. Техническое зрение. Инновации. М.: Техносфера, 2014.

И.О. ЗОЛОТОВСКИЙ, В.А. ЛАПИН, Д.И. СЕМЕНЦОВ
Ульяновский государственный университет

ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ В УСИЛИТЕЛЯХ С БЕГУЩЕЙ ВОЛНОЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Исследуются условия частотной модуляции, спектрального уширения и усиления гауссова импульса, распространяющегося в активном световоде с реализуемой бегущей волной показателя преломления.

I.O. ZOLOTOVSKII, V.A. LAPIN, D.I. SEMENTSOV
Ulyanovsk State University

GENERATION OF FREQUENCY-MODULATED WAVE PACKETS IN AMPLIFIER WITH A TRAVELING REFRACTIVE INDEX WAVE

The conditions for frequency modulation, spectral broadening, and amplification of a Gaussian pulse propagating in an active fiber with a running wave of the refractive index are investigated.

В настоящей работе предложена методика усиления и модуляции импульсов в активной среде с реализуемой бегущей волной показателя преломления (БВПП). Показано, что взаимодействие волнового пакета с БВПП (рис. 1) приводит к сильной частотной модуляции (ЧМ) усиливаемого импульса при сохраняющейся линейности chirpa.

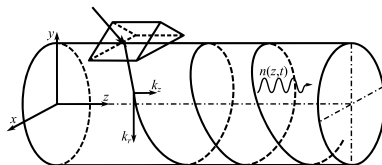


Рис. 1. Траектория луча в цилиндрическом световоде, вводимого через призму и представляющего волну типа МШГ БВПП [1]

Динамика временной огибающей ВП описывается уравнением для амплитуды огибающей вида НУШ [2, 3]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} - i \frac{d_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + iR|A|^2 A = i\beta m \cos[\Omega(\tau - \delta\tau)] A + gA \quad (1)$$

где $\tau = t - z/v_g$ – время в бегущей системе координат, $d_2 = (d^2\beta/d\omega^2)$ – параметр дисперсии групповых скоростей, R – параметр нелинейности.

На рис. 2 приводятся зависимости огибающей (а) и мгновенной частоты (б) на выходе из световода с оптической длиной пути $L = 500$ м спектрально ограниченного гауссового импульса:

$$A(\tau, z = 0) = A_0 \exp(-\tau^2 / 2\tau_0^2), \quad (2)$$

полученные путем численного решения уравнения (1) методом SSF [1]. При следующих значениях параметров: начальная длительность $\tau_0 = 10^{-11}$ с, мощность $P_0 = 10$ Вт кривая (0), ДГС $d_2 = -10^{-26}$ с²/м, параметр нелинейности $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – кривые (1-3), параметре усиления среды $g(\omega) = g_0 \left[1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega_L^2 \right]^{-1}$, $g_0 \approx 10^{-2}$ м⁻¹, $\Delta\omega_L = 10^{11}$ с⁻¹.

Из рис. 2 видно, что в среде с БВПИ импульс может быть усиливаться, сохраняя свою форму, при ширине линии усиления $\Delta\omega_L = 10^{11}$ с⁻¹. При этом импульс приобретает практически линейный чирп, что обеспечивает возможность его дальнейшего эффективного сжатия на дифракционной решётке.

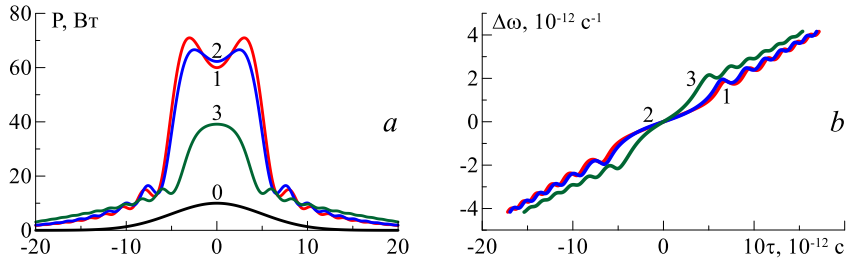


Рис. 2. Динамика огибающей (а) и мгновенной частоты (б) импульса на выходе из световода с БВПИ при $R = 10^{-7}; 10^{-5}; 10^{-3}$ (Вт·м)⁻¹ – кривые (1-3)

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-42-730013.

Список литературы

1. Торчигин В.П. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 12. С. 1089-1094.
2. Золотовский И.О., Коробко Д.А., Лапин В.А., Семенов Д.И. // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 121. № 2. С. 277-284.
3. Zolotovskii I.O., et al. // JOSA B. V. 36. No. 10. P. 2877-2883.

Н.Н. БАЛАН, В.В. ИВАНОВ, А.Л. ПАНКРАТОВ

Научно-исследовательский институт молекулярной электроники, Зеленоград

**МЕТОД РАСЧЁТА ДОПУСКОВ НА КРИТИЧЕСКИЕ
ЛИНЕЙНЫЕ РАЗМЕРЫ И ТОЧНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ РИСУНКА ФОТОШАБЛОНОВ
ДЛЯ ПРОЕКЦИОННОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ**

В работе на основе моделирования процессов проекционной фотолитографии анализируется вклад допусков на критические линейные размеры и точность размещения элементов рисунка фотошаблона в бюджеты литографических операций.

N.N. BALAN, V.V. IVANOV, A.L. PANKRATOV

Molecular Electronics Research Institute, Zelenograd

**METHOD FOR CALCULATION OF PHOTOMASK CD-
AND REGISTRATION TOLERANCES IN PROJECTION
PHOTOLITHOGRAPHY**

In this work we consider the contribution of tolerances on the mask pattern quality to the error budgets of lithographic operations. A method for developing a photomask specification based on the lithography modeling is proposed.

Фотошаблон (ФШ) является ключевым элементом при производстве интегральных схем и, в большинстве случаев, представляет собой кварцевую подложку с покрытием из маскирующего материала, в котором сформирован рисунок литографического слоя (или слоёв), состоящий из десятков миллионов элементарных топологических структур [1], к размеру и точности размещения которых предъявляются весьма строгие требования. Корректное определение этих требований представляется необходимым условием достижения приемлемого качества литографических операций.

Создание спецификации на комплект ФШ происходит, как правило, на завершающей стадии разработки технологии изготовления того или иного класса изделий и основывается на сформулированных ранее требованиях к литографическим операциям технологического маршрута (допуски на дефокусировку, критический размер контрольного элемента, а также требования к точности совмещения слоёв).

В данной работе на основе зарубежного и собственного опыта делается попытка описания метода составления типовой спецификации на ФШ с точки зрения удовлетворения требованиям к литографическим операциям. В качестве источника таких требований берутся материалы ITRS [2], касающиеся литографии в ультрафиолетовом излучении на длинах волн 365, 248 и 193 нм; используются также стандарты на технологические процессы и оборудование ISMI [3].

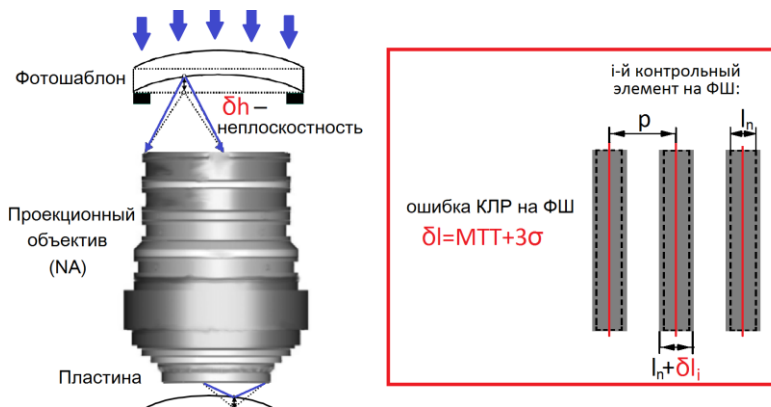


Рис. 1. Основные виды отклонений на фотошаблонах (ФШ), вызывающих потерю качества литографического процесса (КЛР)

Как пример применения описываемого метода, в работе на основе моделирования процессов проекционной фотолитографии определяется вклад допусков на параметры ФШ в бюджеты литографических операций для технологии уровня 65 нм. Приводится полученная оценочная спецификация на критические ФШ в части допусков на линейные размеры, неплоскость подложки (рис. 1), а также точность размещения элементов рисунка ФШ: $MTT_{\delta l} \leq 5$ нм; $3\sigma_{\delta l} \leq 2,7$ нм; $\delta h \leq 250$ нм; $R \leq 10$ нм, что демонстрирует некоторое сходство с данными, представленными в ITRS [2]. Столь низкое значение $3\sigma_{\delta l}$ обусловлено тем, что в составе тестовых рисунков использовались одиночные линии.

Список литературы

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С. Развитие полупроводниковой микроэлектроники ОАО «НИИМЭ и Микрон», история отечественной электроники. В 2-х томах. М., 2013.
2. SIA Website - The International Technology Roadmap for Semiconductors. Lithography. 2001-2013 Revisions. <https://www.semiconductors.org/?s=itrs>.
3. ISMI 450 mm Equipment Performance Metrics v5.0. International SEMATECH Manufacturing Initiative, 2010.

М.М. ВЕКШИН, Н.А. ЯКОВЕНКО
Кубанский государственный университет, Краснодар

ОСОБЕННОСТИ МОДОВОГО СОСТАВА СУБМИКРОННОГО As_2S_3 ВОЛНОВОДА

Высококонтрастный интегрально-оптический As_2S_3 полосковый волновод с асимметричным профилем показателя преломления в вертикальном направлении имеет гибридные моды, что даёт возможность создать преобразователь поляризации оптического излучения на его основе.

М.М. VEKSHIN, N.A. YAKOVENKO
Kuban State University, Krasnodar

SPECIAL FEATURES OF SUBMICRON As_2S_3 WAVEGUIDE MODE CHARACTERISTICS

High-contrast integrated-optic As_2S_3 strip waveguides with asymmetric refractive index profile in vertical direction have hybrid modes, which gives the possibility to build polarization converters on its base.

Цель работы состоит в расчёте и анализе параметров мод интегрально-оптического высококонтрастного As_2S_3 полоскового волновода и исследовании применения таких волноводов рупорообразной формы в качестве пассивного преобразователя поляризации оптического излучения. Расчётные параметры полоскового волновода: показатель преломления волноводного канала n_f – 2,4, подложки из стекла n_s типа К-8 – 1,5, покровной среды n_c – 1. Длина волны – 1,55 мкм. Высота волноводного канала – 0,3 мкм. Для расчётов ширина канала варьировалась в диапазоне от 0,7 мкм до 1,5 мкм. Поперечное сечение волновода показано на вкладке к рис. 1а.

Результат полного векторного расчёта мод волновода с указанными параметрами показан на рис. 1а, на котором представлена зависимость эффективного показателя преломления волноводных мод от ширины волноводного канала. Анализ характеристик мод волновода позволил установить следующие закономерности их формирования. У второй и третьей моды волновода существует определённая область его ширины ~ 1,2 мкм (отмеченная на графике), в которой эффективные показатели преломления этих мод имеют близкие значения. Вторая мода, появляющаяся как мода TM_0 , по мере увеличения ширины волновода

после прохождения этой области изменяет ориентацию своей поляризации и пространственную структуру поля и переходит в моду TE_1 . Третья мода, зарождающаяся как мода TE_1 , имеет ту же особенность – после указанной области сближения кривых эта мода трансформируется в моду TM_0 . В области с близкими значениями эффективных показателей преломления обе моды имеют гибридный характер с соразмерными поперечными компонентами полей.

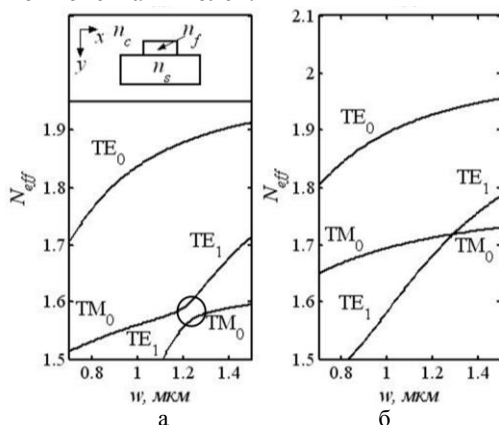


Рис. 1. Зависимость эффективного показателя преломления волноводных мод полоскового As_2S_3 волновода от его ширины в случае асимметричного профиля показателя преломления по оси y (а) и симметричного профиля (б)

Был проведён аналогичный расчёт с волноводом, у которого показатель преломления покровной среды был равен показателю преломления подложки. Остальные параметры волновода были те же, что и в первом случае. Результаты этого расчёта показаны на рис. 1б. В данном случае все моды линейно поляризованы. Таким образом, асимметрия профиля показателя преломления приводит к появлению гибридных мод.

Эти особенности мод полоскового волновода с асимметричным профилем дают возможность создать пассивный преобразователь поляризации оптического излучения, состоящий из волновода рупорообразной формы. Принцип действия преобразователя поляризаций основан на модовой эволюции, а физической основой этого преобразования является наличие у волновода в определённом интервале значений его ширины гибридных мод. В таком волноводе мода TM_0 преобразуется в моду TE_1 .

В.Г. ВОЛКОВ, П.Д. ГИНДИН, В.В. КАРПОВ, С.А. КУЗНЕЦОВ
Московский завод «САПФИР», Москва

ПРИЦЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Рассматривается прицельный комплекс, состоящий из наголовного блока наблюдения и лазерного целеуказателя, монтируемого на оружии. Комплекс обеспечивает работу днем, ночью и в любых атмосферных условиях.

V.G. VOLKOV, P.D. GINDIN, V.V. KARPOV, S.A. KUZNETSOV
JSC «Moscow plant «SAPHIR», Moscow

SIGHTING COMPLEX

A sighting system consisting of a head-mounted surveillance unit and a laser designator mounted on a weapon is considered. The complex provides work day, night and in any atmospheric conditions.

Известен ночной прицельный комплекс «Альфа-1962»[1]. Он содержит блок наблюдения (БН) и блок целеуказания (БЦ) – ИК лазерного целеуказателя (ЛЦ). Здесь не нужно прицеливаться обычным способом – нужно придать оружию с ЛЦ положение, когда пятно подсвета от ЦЛ совпадает с целью – и можно открывать прицельный огонь из любого положения оружия и при стрельбе с ходу. Комплекс работает ночью, но не работает днем и при пониженной прозрачности атмосферы (ПА) [1]. Блок-схема комплекса, свободного от этих недостатков, дана на рис. 1, а его внешний вид – на рис. 2 [2].

При работе днем в условиях нормальной (ПА) БН 1 отключен. При этом переключатель 21 замыкает контакт входа первого лазерного полупроводникового излучателя (ЛПИ) 17. Блок накачки 22 запускает ЛПИ 17, излучающий на длине волны 0,53 мкм или 0,63 мкм. Излучение проходит через дихроичное зеркало 16 и коллимируется первым объективом формирования излучения (ОФИ) 15, создавая точечное пятно подсвета, наблюдаемое оператором. При работе ночью в условиях нормальной ПА и достаточно высоком уровне естественной ночной освещённости (ЕНО) включается ЭОП 3 БН 1. При этом переключатель 21 замыкает контакт входа второго ЛПИ 18. Его излучение отражается от зеркала 16 и коллимируется первым ОФИ 15, создавая точечное пятно подсвета. Объектив 2 создает изображение цели, фона, и пятна подсвета

на фотокатоде ЭОП 3. Изображение с экрана ЭОП 3 передаётся через куб-призму 4 в окуляр 5.

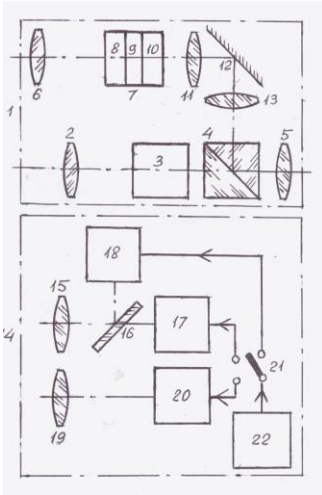


Рис. 1. Блок-схема прицельного комплекса



Рис. 2. Внешний вид прицельного комплекса

При работе днем, ночью при пониженной ПА и при низком уровне ЕНО вместо ЭОП 3 включается тепловизионный модуль (ТПМ) 7 БН 1. Переключатель 21 замыкает контакт входа третьего ЛПИ 20. Он излучает на длине волны 10,3 мкм. Второй ОФИ 19 коллимирует это излучение, создавая точечное пятно подсвета. ИК-объектив 6 создает тепловое изображение цели, фона и пятна подсвета на матрице микроболометров 8 ТПМ 7. Она преобразует тепловое излучение в электрический сигнал. Он усиливается, обрабатывается в электронном блоке 9 и передается в OLED дисплей 10. Видимое изображение с его экрана через первый компонент оптики переноса 11, плоское зеркало 12 и второй компонент оптики переноса 13 передается в куб-призму 4, и в окуляр 5. Излучение в области спектра 8 - 12 мкм хорошо проходит через рассеивающие среды поэтому можно вести наблюдение при пониженной ПА.

Список литературы

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009.
2. Прицельный комплекс круглосуточного и всепогодного действия. Патент № 2717744 по заявке № 2019117578 с приоритетом от 17.01.2019.

И.В. БАЛАКИРЕВА, И.Ю. БЛИНОВ, Н.П. ХАТЫРЕВ
*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

ГРАВИМЕТР НА ОПТИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ С МОДАМИ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ

Предложена конструкция оптического гравиметра на резонаторах с модами шепчущей галереи, позволяющая проводить измерения в широком диапазоне. Обсуждаются режимы работы устройства для использования его в различных условиях.

I.V. BALAKIREVA, I.Yu. BLINOV, N.P. KHATYREV
*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements,
Mendeleevo, Moscow region*

GRAVIMETER ON THE OPTICAL WHISPERING GALLERY MODE RESONATORS

A design of an optical gravimeter based on whispering gallery mode resonators, which allows measurements in a wide range, is proposed. The operation regimes of the device for use in various meteorological conditions are discussed.

Резонаторы с модами шепчущей галереи (далее – МШГ резонаторы) представляют собой небольшие диски, кольца или сферы из оптических материалов диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Излучение лазера вводится в них при помощи соединительного элемента, которым может быть, например, призма или растянутое оптическое волокно. МШГ резонаторы обладают собственными модами – набором частот, которые могут быть в нём возбуждены. МШГ резонаторы известны своей чувствительностью к внешним воздействиям. Существуют различные датчики на их основе, включая биосенсоры, акселерометры и т. п. [1].

Гравиметрические датчики на МШГ резонаторах основаны на их чувствительности к применённому ускорению [2]. Известны акселерометры, основанные на изменении расстояния между резонатором и соединительным элементом [3]. В таких устройствах соединительный элемент располагается на неподвижной платформе, а резонатор – на вертикальном подвесе или подвижной консоли.

При применении ускорения к резонатору, меняется расстояние между резонатором и соединительным элементом, в результате чего изменяется ширина и амплитуда моды. Соответственно, при наблюдении изменений моды на выходе резонатора, можно узнать о воздействии, применённом к микрорезонатору. Проведённые ранее лабораторные работы показали применимость данной конструкции к измерению ускорения с чувствительностью до $0,7 \times 10^{-6}$ g [4 - 7].

В данной работе производится изучение способов совершенствования гравиметра на МШГ резонаторах для создания прибора с возможностью применения в различных условиях, в том числе в условиях Арктики и космоса. Предложен способ расширения диапазона измерений путём введения дополнительных элементов в конструкцию. Обсуждаются различные режимы работы устройства для повышения чувствительности и точности измерений.

Список литературы

1. Foreman M.R., et al. // Adv Opt Photonics. 2015. V. 7(2). P. 168-240.
2. Балакирева И.В. и др. // Альманах современной метрологии. 2020. V. 4 (24). P. 337-348.
3. Armenise M.N., et al. // J. Light. Technol. 2001. V. 19. No. 10. P. 1476-1494.
4. Li Y.L., Barker P.F. // Sensors. 2018. V. 18. P. 4184.
5. Li Y. L., Barker P.F. // J. Light. Technol. 2018. V. 36 (18). P. 3919.
6. Ioppolo T., et al. // J. Opt. Soc. Am. B. 2011. V. 28. No. 2. P. 225-227.
7. Ioppolo T., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. P. 013535.
8. Laine J.-P. et al. // Sensors and Actuators A: Physical. 2001. V. 93 (1). P. 1-7.

С.Н. АНДРЕЕВ¹, С.Ю. КАЗАНЦЕВ^{1,2}, А.Ю. МУЗЫЧКА¹

¹*Московский политехнический университет*

²*Московский технический университет связи и информатики*

ДАТЧИК ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ

Представлены результаты экспериментальных исследований датчика волнового фронта на основе эффекта Тальбота. Создан стенд, на котором проведены исследования различных двумерных периодических решёток и получены контрастные тальбограммы в нескольких плоскостях воспроизведения, которые с успехом могут быть распознаны и обработаны на компьютере. Установлено, что решётки для исследований эффекта Тальбота в оптической области спектра могут быть напечатаны лазерным принтером на лавсановой плёнке.

S.N. ANDREEV¹, S.Yu. KAZANTSEV^{1,2}, A.Yu. MUZYCHKA¹

¹*Moscow Polytechnic University*

²*Moscow Technical University of Communications and Informatics*

WAVE FRONT SENSOR FOR WIDE-APERTURE LASER BEAMS

The results of experimental studies of the wavefront sensor based on the Talbot effect are presented. A stand was created on which various periodic gratings were studied using lasers of the visible wavelength range and contrast talbograms were obtained in several reproduction planes, which can be successfully recognized and processed on a computer. It was found that gratings for studying the Talbot effect in the optical region of the spectrum can be printed with a laser printer on a Mylar film.

Проблема контроля волнового фронта (ВФ) широкоапертурных пучков актуальна для многих приложений лазерной физики и атмосферной оптики [1]. Известно, что для контроля ВФ мощных широкоапертурных ИК-лазеров с успехом может применяться подход, основанный на эффекте Тальбота [2]. В эффекте Тальбота распределение интенсивности светового пучка, падающего на периодическую решётку, полностью воспроизводится на кратных расстояниях, при этом распределение имеет подобную решётке структуру, если ВФ плоский или сферический. Данное свойство выгодно использовать при юстировке лазерного резонатора и оптических схем, где предъявляются высокие требования к качеству оптических элементов и их согласованию. Проблемы достижения

высокого пространственного разрешения для широкоапертурных изображений в ИК-области и необходимость их быстрой обработки, в прошлом не позволили в полной мере проявить все преимущества датчиков ВФ на основе эффекта Тальбота. Прогресс в области создания цифровых оптических камер, разработка эффективных экранов для визуализации ИК-излучения, а также совершенствование аппаратных и программных средств обработки изображений, на основе самообучающихся нейронных сетей позволяет сегодня разрешить эти проблемы. Поэтому, весьма перспективным направлением представляется проработка возможности создания датчика ВФ на основе эффекта Тальбота, что и являлось целью этой работы. Математическая обработка тальбограмм, полученных с использованием нецепного химического HF лазера [2], выявила необходимость получения дополнительных интерференционных изображений для обучения нейронной сети. Поэтому нами был собран стенд, в котором были задействованы лазеры видимого диапазона с $\lambda = 633$ нм и $\lambda = 533$ нм для проработки оптимальной конструкции датчика ВФ и отладки алгоритмов анализа тальбограмм. Были исследованы решётки с периодом от 0.5 до 1.5 мм, разной геометрии. Исследования показали высокую эффективность и чувствительность датчика ВФ на основе эффекта Тальбота. На рис. 1 показаны типичные тальбограммы получаемые на экспериментальном стенде во второй плоскости воспроизведения: на рис. 1а и 1б трасса пучка не возмущалась; на рис. 1в показана тальбограмма, полученная, когда лазерный пучок проходил на расстоянии 5 см над пламенем зажигалки.

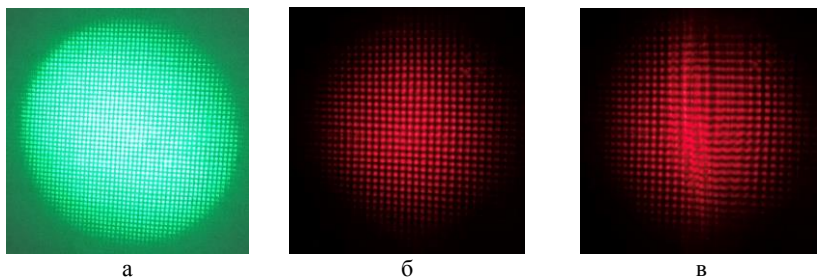


Рис. 1. Тальбограммы полученные во второй плоскости воспроизведения: использовался пучок зелёного лазера диаметром 50 мм (а); гелий-неоновый лазер (б); гелий-неоновый лазер, трасса возмущена тепловым потоком (в)

Список литературы

1. Рукосуев А.Л. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 2. С. 189-195.
2. Ignat'ev A.B. et al. // Quantum Electronics. 2008. V. 38. № 1. P. 69-72.

Д.Г. ДЕНИСОВ, А.А. ЗОЛОТУХИНА, А.В. КУДРЯШОВ¹,
А.Н. НИКИТИН¹

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
¹Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН, Москва*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА ШЭКА-ГАРТМАНА

Был проведён анализ достоинств и недостатков методов калибровки датчика волнового фронта Шэка-Гартмана: по плоскому волновому фронту (калибровка по наклону датчика) и сферическому волновому фронту (абсолютная калибровка). Также было проведено сравнение точностных показателей выходных параметров датчика после калибровки по этим методам при одинаковых заданных условиях измерений.

D.G. DENISOV, A.A. ZOLOTUKHINA, A.V. KUDRYASHOV¹,
A.N. NIKITIN¹

*Bauman Moscow State Technical University
¹Institute of Geosphere Dynamics of the RAS, Moscow*

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALIBRATION OF A SHACK-HARTMANN WAVEFRONT SENSOR

The advantages and disadvantages of the methods for calibrating the Shack-Hartmann wavefront sensor using a flat wavefront (calibration by turning the sensor) and a spherical wavefront (absolute calibration) were analyzed. We also compared the accuracy of the sensor output parameters after calibration using these methods under the same specified measurement conditions.

Анализ волнового фронта датчиком Шэка-Гартмана (ДШГ) имеет множество применений, а также ряд преимуществ перед интерферометрическими методами измерений. ДШГ конструктивно состоит из двух элементов: линзового растра и фотодетектора. Для конкретного применения с помощью выбора этих элементов можно «масштабировать» датчик по двум обратно пропорциональным характеристикам – динамическому диапазону и чувствительности [1].

ДШГ восстанавливает фазу волнового фронта по смещению фокального пятна на фотодетекторе от исходного положения вследствие локального наклона волнового фронта в пределах субапертуры

(микролинзы). Для определения этого смещения необходимы точные значения параметров ДШГ: расстояния между линзовым растром и фотодетектором, размера пикселя фотодетектора и шага линзового раstra. Из этого следует, что невозможно проведение измерений датчиком без предварительной калибровки, важным этапом которой также является запись референса.

В процессе исследования были рассмотрены два метода калибровки ДШГ: калибровка по наклону ДШГ на известный угол [2] и абсолютная калибровка ДШГ [3, 4]. Их отличие состоит в записанном референсе, относительно которого составляется карта волнового фронта, и способе определения точных геометрических параметров датчика. Также были рассмотрены дополнения к методу абсолютной калибровки, предложенные в работах [5, 6].

Для исследования было необходимо рассмотреть особенности анализа датчиком Шэка-Гартмана плоского и сферического волнового фронта. Также было проведено сравнение способов определения динамического диапазона. Для сравнения точности представленных методов калибровки были заданы одинаковые условия измерений и построены графики зависимости погрешности выходных данных от точности параметров ДШГ.

Список литературы

1. Neal D.R., Copland J., Neal D.A. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy // Proc. SPIE. V. 2002. P. 4779.
2. Nikitin A.N., Kudryashov A.V., Sheldakova J., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. Hartmannometer vs Fizeau interferometer: advantages and drawbacks // SPIE Conferences and Exhibitions «Photonics West-2015». 2015. San Francisco, USA. P. 9369-5.
3. Chernishov A., et al. Calibration of a Shack-Hartmann sensor for absolute measurements of wavefronts // Appl. Opt. 2005. V. 44. P. 6419-6425.
4. Nikitin A.N., Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A.V., Baryshnikov N., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. Absolute calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor for measurements of wavefronts // SPIE "Photonic Instrumentation Engineering VI". 2019.
5. Yang J., Wei L., Chen H., Rao X., Rao C. Absolute calibration of Hartmann-Shack wavefront sensor by spherical wavefronts // Optics Communications. 2009. V. 283(6). P. 910-916.
6. Bautsch J., Schake M., Ehret G., Berg U., Wagner L., Pfund J., Tutsch R. Traceable calibration of Shack-Hartmann wavefront sensors employing spherical wavefronts. 2020.

Н.А. УС, А.А. АВЕРШИН, М.В. МУРАВЛЕВ

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
Воронеж*

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ КОЛЬЦЕВОГО МОНОБЛОЧНОГО ГИРОСКОПА

В статье представлен расчёт показателей качества оптической схемы кольцевого лазерного гироскопа с активной газовой средой и разработанного кольцевого моноблочного гироскопа с пассивным контуром. Анализ показателей качества оптических схем ещё на этапе разработки позволяет выбрать оптимальную конфигурацию лазерных гироскопов. В исследовании сравнивались радиус луча в перетяжке и радиус луча на выходе оптической схемы.

N.A. US, A.A. AVERSHIN, M.V. MURAVLEV

Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh

INDICATORS OF QUALITY OF THE OPTICAL SCHEME OF THE RING MONOBLOCK GYROSCOPE

In article calculation of indicators of quality of the optical scheme of ring laser gyroscope with active gas medium and the developed ring monoblock gyroscope with passive contour is provided. The analysis of indicators of quality of optical schemes at development stage allows to choose optimum configuration of laser gyroscopes. In research were compared beam radius in banner and beam radius at the release of the optical scheme.

Реализация оптического контура гироскопа с активной средой формирует излучение внутри оптического канала. При этом значение радиуса луча в перетяжке много меньше значение радиуса луча на оптическом элементе (зеркале), что определяет большую расходимость излучения (рис. 1а). При реализации разработанного оптического контура оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа с лазерным диодом (КМГ с ЛД) радиусы лазерного излучения в перетяжке и на выходе оптического элемента практически равны за счёт отсутствия активной среды контура и рационально рассчитанных конструктивно-технологических решений (рис. 1б) [1].

Применив закон ABCD матриц получили для каждой из оптических схем эквивалентную матрицу М [2]. С учётом элементов обратной

диагонали (В-С) эквивалентной матрицы М выражения для расчёта радиуса луча в перетяжке w_1 и радиуса луча на выходе w имеет вид:

$$w_1 = \sqrt{\frac{-\lambda \sin \theta}{\pi C}}, \quad (1)$$

$$w = \sqrt{\frac{\lambda B}{\pi \sin \theta}}, \quad (2)$$

где λ – длина волны лазерного излучения, В и С – элементы матрицы, θ – угол падения лазерного излучения на отражательный элемент [3].

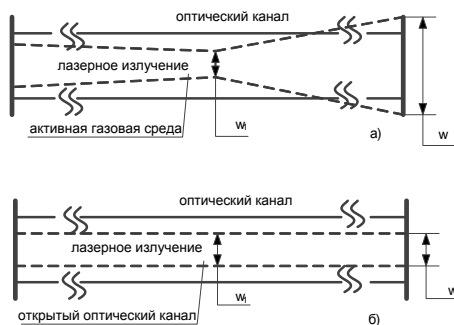


Рис. 1. Формирование оптического излучения в канале лазерного гироскопа: оптический канал с активной газовой средой (а), открытый оптический канал (б)

Различие между значениями пучка в перетяжке и на оптических элементах при прочих равных условиях приводит к необходимости увеличения потребляемой энергии.

Список литературы

1. Ус Н.А., Задорожный С.П., Авершин А.А., Склярова О.Н. Способ повышения добротности оптического контура кольцевого моноблочного лазерного гироскопа // пат. 2709014 Российской Федерации, МПК G01C 19/66. № 2018138304; заявл. 31.10.2018; опубл. 13.12.2019, Бюл. № 35.
2. Ус Н.А. Авершин А.А. Методика расчета оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа бесплатформенной инерциальной навигационной системы военного назначения // Электронный периодический научный журнал «Воздушно-космические силы. теория и практика». 2019. № 12. С. 19-125.
3. Ус Н.А., Авершин А.А. Математическая модель оптической схемы кольцевого моноблочного гироскопа // Труды МАИ. 2018. № 103.

К.А. ЗАГОРУЛЬКО¹, М.Л. ВОСКАНОВ¹, А.В. КОЗЛОВ^{1,2},
Н.П. ХАТЫРЕВ¹

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская обл.*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЛИНИИ УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРОВ

Представлены результаты измерений спектральной ширины линии излучения волоконных лазеров на миллисекундных интервалах с использованием метода оптического гетеродинамирования. Для проведения измерений требуется фотоприёмник с полосой пропускания не менее ≈ 100 МГц и радиочастотный анализатор спектра с режимом быстрого преобразования Фурье или цифровой осциллограф (АЦП). Используя данную экспериментальную установку, можно проводить измерения спектральной ширины лазерных линий в диапазоне значений от единиц Гц до десятков МГц.

K.A. ZAGORULKO¹, M.L. VOSKANOV¹, A.V. KOZLOV^{1,2},
N.P. KHATYREV¹

¹*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical
Measurements, Mendeleevo, Moscow region*

²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)*

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF LASER LINEWIDTH

We report on the results of fiber laser linewidth measurements at millisecond intervals using optical heterodyne method. A photodetector with a bandwidth of at least ≈ 100 MHz and a FFT RF spectrum analyzer or a digital oscilloscope (ADC) are required for the measurements. Using this experimental setup, it is possible to measure laser linewidths in the range of Hz to tens of MHz.

Для измерений спектральной ширины линии (ШЛ) узкополосных лазеров, как правило, используются три метода: метод самогетеродинамирования с волоконной линией задержки [1], метод гетеродинамирования с использованием опорного, более узкополосного лазера или второго лазера с идентичными характеристиками [2] и расчётный метод определения ШЛ на основе измеренного спектра фазовых шумов исследуемого лазера [3].

В данной работе измерения ШЛ одночастотных волоконных лазеров Koheras Adjustik E15 Power ($\lambda \approx 1542$ нм) проводились в соответствие с

функциональной схемой, показанной на рис. 1. Выходное излучение лазеров сбивалось на волоконном разветвителе ВР (50/50 %), проходило через поляризационно-зависимый изолятор ВИ и подавалось на вход фотоприёмника ФП (Menlo Systems FPD 310). Спектральные характеристики сигнала биений лазеров измерялись с помощью радиочастотного анализатора спектра (РАС, Rohde & Schwarz FSW).

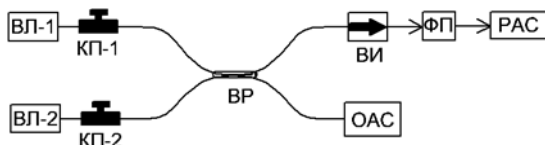


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

На миллисекундных интервалах измерений спектральные линии лазеров аппроксимируются, как правило, гауссовой формой. Спектр сигнала биений лазеров тоже имеет гауссову форму и $\Delta v_{beat}^2 = \Delta v_{L1}^2 + \Delta v_{L2}^2$. В случае двух одинаковых лазеров $\Delta v_{L1} = \Delta v_{L2} = \Delta v_L$ и $\Delta v_L = \Delta v_{beat} / \sqrt{2}$ (1). Фильтр РАС (RBW) также имеет гауссову форму, поэтому $\Delta v_{ESA}^2 = \Delta v_{beat}^2 + RBW^2$, откуда получаем $\Delta v_{beat} = \sqrt{\Delta v_{ESA}^2 - RBW^2}$ (2).

Измерения проводились при $RBW = 2$ кГц на интервале измерений 1,05 мс в режиме БПФ. Среднее значение ШЛ сигнала биений $\Delta \bar{v}_{beat} = 836,6$ Гц ≈ 837 Гц рассчитано согласно (2) по результатам 20-ти измерений Δv_{ESA} . Измеренное значение $\Delta v_{beat} = 837$ Гц является верхней границей значений ШЛ каждого из лазеров, если их ШЛ существенно отличаются. Если данная методика используется для измерений ШЛ двух одинаковых лазеров, то значение ШЛ каждого из них определяется соотношением (1): $\Delta v_L = \Delta v_{beat} / \sqrt{2}$, в данном случае $\Delta v_L \approx 592$ Гц.

Для большинства приложений узкополосных лазеров достаточно таких измерений верхней границы значений ШЛ лазеров, например $\Delta v_L \leq 1$ кГц [4]. Если доступны более двух лазеров с близкими значениями ШЛ, то с использованием данной методики можно рассчитать значения ШЛ для каждого из лазеров по методу трёх генераторов.

Список литературы

1. Okoshi T., et al. // Electron. Lett. 1980. V. 16 (16). P. 630-631.
2. Von Bandel N., et al. // Optics Express. 2016. V. 24 (24). P. 27961-27978.
3. Di Domenico G., et al. // Appl. Opt. 2010. V. 49 (25). P. 4801-4807.
4. Nikitin S., et al. // J. Lightwave Technol. 2020. V. 38 (6). P. 1446-1453.

Е.Ю. ЗЛОКАЗОВ, В.А. НЕБАВСКИЙ, Р.С. СТАРИКОВ,
П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ПОВЫШЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ДИАПАЗОНА ЛИНЕАРИЗОВАННЫХ СХЕМ С ДВОЙНЫМ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ МОДУЛЯТОРОМ МАХА-ЦАНДЕРА

Обсуждаются возможности увеличения свободного динамического диапазона радиофотонных систем с помощью использование двойных параллельных модуляторов Маха-Цандера.

E.Yu. ZLOKAZOV, V.A. NEBAVSKIY, R.S. STARIKOV,
P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

INCREASING THE LINEAR RANGE OF LINEARIZED CIRCUITS WITH DUAL PARALLEL MACH-ZEHNDER MODULATOR

The possibilities of increasing the spurious-free dynamic range of microwave photonic systems by using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator are discussed.

Новейший прогресс элементной базы систем микроволновой фотоники (радиофотоники) обусловил всё более широкий спектр их практических применений, главным образом благодаря широкополосности и приемлемой энергоэффективности. В настоящее время имеется значительное количество примеров удачного, в том числе коммерчески успешного, использования технологий микроволновой фотоники при построении радиотехнических систем различного назначения – от ФАР до систем поддержки 5G, а также в разработке новейших систем 6G.

Основа любого устройства микроволновой фотоники – аналоговый оптический тракт (АОТ) – в силу технических и принципиальных физических ограничений обеспечивает то или иное качество сигнала [1, 2]. Блок-схема АОТ представлена на рис. 1. Качество сигнала АОТ характеризуется определёнными параметрами: отношением «сигнал/шум», свободным динамическим диапазоном (SFDR) и др., находящимися в естественном компромиссе с его энергетикой и полосой частот [3]. Так как основными источниками искажений в АОТ являются

нелинейности волокна, модулятора, фотодиодов, а также шумы лазеров и усилителей, улучшение характеристик АОТ – это не только важная научная задача, но также возможность для развития совершенно новых областей индустрии.

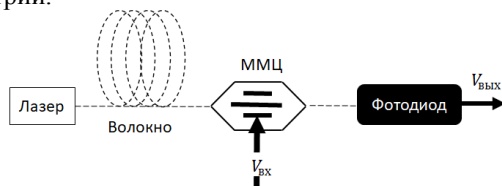


Рис. 1. Блок-схема АОТ (на схеме ММЦ – модулятор Маха-Цандера)

Одним из методов линейризации является использование схем с двойным параллельным модулятором Маха-Цандера (ДП-ММЦ) [4, 5], пример такой схемы для двухтонового сигнала представлен на рис. 2. Данная схема позволяет подавить нелинейные искажения как второго, так и третьего порядка, позволяя достичь величины свободного динамического диапазона вплоть до 134 дБ.

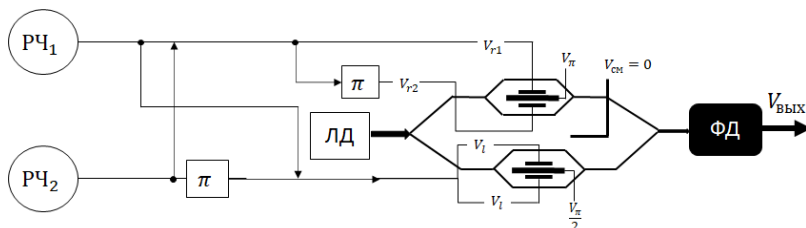


Рис. 2. Схема линейризованного АОТ с ДП-ММЦ: РЧ_{1,2} – СВЧ-источники, ЛД – лазерный диод, ФД – фотодиод, π – фазовращатель СВЧ

Перспективы развития, данного метода связаны с возможностью миниатюризации схемы, а также заменой стандартных ММЦ на ММЦ с микрокольцевыми резонаторами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-37-90119).

Список литературы

1. Cox C. III Analog Optical Links. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
2. Urick V. Fundamentals of Microwave Photonics. Wiley, 2015.
3. Burla M., Hoessbacher C., Heni W., et al. A 325 GHz analog photonic link // International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP). Ottawa, 2019. P. 1-3.
4. Zhao F., Lu Y., Zhang L., Cai W., Wu S., Zhang Y. Linearized microwave photonic link based on dual-driven Mach-Zehnder modulator // Optical Engineering 2020. V. 59. № 1. P. 1.
5. Singh S., Arya S.K., Singla S. Linearization of photonic link based on phase-controlled dual drive dual-parallel Mach-Zehnder modulator // Wireless Personal Comm. 2020. V. 114. № 1. P. 85-92.

В.Л. ТРЯПИЦЫН, С.К. КРУГЛОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМА СЖАТИЯ ДАННЫХ ПО ПРОТОКОЛУ LZW ДЛЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

Рассматривается система сжатия данных по протоколу LZW спектральных сигналов в озонometре. Приведены критерии выбора алгоритма сжатия данных. Приведены результаты моделирования по кодированию и декодированию данных акустооптического анализатора спектра и результаты экспериментальной проверки алгоритма системы сжатия.

V.L. TRYAPITSYN, S.K. KRUGLOV

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

LZW PROTOCOL DATA COMPRESSION SYSTEM FOR ACOUSTO-OPTICAL SPECTRUM ANALYZER

The article discusses the data compression system for the protocol of LZW spectral signals in the ozonometre. Criteria for choosing a data compression algorithm are given. The results of modeling for coding and decoding of data of an acousto-optic spectrum analyzer are presented.

Данная работа посвящена разработке метода сжатия в системе сбора данных для многоканальных акустооптических спектроанализаторов [1]. В процессе анализа спектральных данных сделан вывод, что протокол, основанный на кодировании повторяющихся чисел хорошо подходит для их сжатия, поскольку они имеют повторяющиеся значения, и отсчёты, находящиеся на одних и тех же позициях кадра, долго (до 10 секунд) не меняются. Пример кадра приведён на рис. 1 [2]. Вторым критерием для выбора протокола кодирования это надёжность и самонастраиваемость. Алгоритм при кодировании (сжатии) сообщения создаёт словарь фраз: определённым последовательностям символов (фразам) ставятся в соответствие группы битов фиксированной длины. При чтении алгоритмом очередного символа в данной позиции находится строка W максимальной длины, совпадающая с какой-то фразой из словаря. Затем код этой фразы подаётся на выход, а строка WK, где K – это символ, следующий за W во входном сообщении, вносится в словарь в качестве новой фразы и ей присваивается какой-то код. В любой момент времени при включении и приёме данных приёмник-декодер автоматически

настраивает правильное заполнение словаря. И это свойство удовлетворяет нашему требованию. Чем больше длина кода, тем больше эффективность сжатия, но тем и больше должна быть ёмкость словаря и разветвленность схемы адресации словаря. Для того, чтобы упростить сложность схемы кодирования / декодирования, сделать её реализуемой на ПЛИС, не обладающей большими вычислительными ресурсами встроенной памятью SRAM, было решено ограничиться длиной кода всего 10 бит. Была создана программа для кодирования и декодирования данных, схема соединений программных блоков представлена на рис. 2.

Для приёма и декодирования потока данных была разработана программа для компьютера, считывающая данные из COM-порта. Она записывала полученные тестовые данные в файл, представляющие последовательность чисел. В другой файл записывались декодированные данные. При размере декодированного файла 1 кБ, размер файла сжатых данных достигает 240 байт. Таким образом коэффициент сжатия при таком наборе данных примерно равен 4. На втором этапе был записан файл спектральных данных, считанных из устройства АОС при помощи программы «Монитор» [1]. При этом эффективность сжатия составила около 10. Это объясняется тем, что в реальных данных корреляция между отсчётами больше, больше повторяющихся последовательностей, они длиннее и чаще появляются. Таким образом была достигнуто эффективное сжатие цифровых данных спектроанализатора, что подтвердило правильность выбора протокола для данной системы и правильность его реализации.

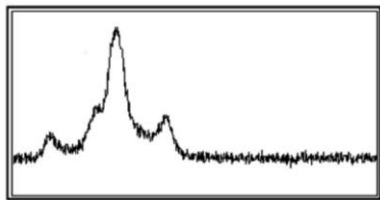


Рис. 1. Вид сигнала профиля излучения пульсара (200 накоплений)

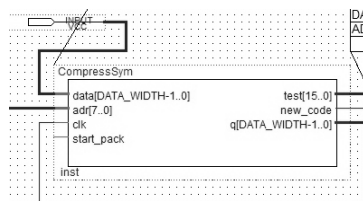


Рис. 2. Схема программного блока сжатия

Список литературы

1. Tryapitsyn V.L., Kruglov S.K., Saenko I.I. Control of demodulation parameters in an optoelectronic spectrometer of an atmospheric monitoring complex // Abstracts of the 13th Intern. conference "Television: images broadcasting & processing", Saint-Petersburg, 2016. P. 222-224.
2. Molodyakov S.A. Features and algorithms of digital signal processing in optoelectronic processors // Digital Signal Processing. 2013. № 3.

Ю.В. ЗАЧИНЯЕВ, А.А. ШТОКОЛОВ, Ю.А. ГУДКОВА

*Инженерно-технологическая академия Южного федерального университета,
Таганрог*

СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ПЕРЕДАЮЩЕГО И ПРИЁМНОГО МОДУЛЕЙ СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ VLC

Приводятся структурные схемы передающего и приёмного модулей системы взаимодействия автомобилей на основе технологии связи по видимому свету (от англ. Visible Light Communication – VLC).

Yu. V. ZACHINYAEV, A. A. SHTOKOLOV, Yu. A. GUDKOVA

Engineering and Technological Academy of Southern Federal University, Taganrog

BLOCK DIAGRAMS OF THE TRANSMITTING AND RECEIVING MODULES OF THE CAR INTERACTION SYSTEM BASED ON VLC TECHNOLOGY

The block diagrams of the implementation of the transmitting and receiving modules of the vehicle interaction system based on VLC technology are given.

Интеллектуальная транспортная система состоит из различных подсистем взаимодействия [1]. Например, автомобиль - автомобиль, автомобиль - пешеход, автомобиль - устройство и т.п. В данной работе рассматривается подсистема автомобиль - инфраструктура и её модуль контроля скорости движения автомобиля на основе технологии VLC.

Метод определения скорости движения транспортного средства был прежде описан в [2]. На рис. 1 и 2 представлены структурные схемы передающего и приёмного модулей разрабатываемой системы.

Передающий модуль интегрируется в систему управления автомобиля, через сетевой интерфейс CAN (Controller Area Network) и получает от него требуемые данные. Основной частью передающего модуля является программируемая интегральная логическая схема (ПЛИС), на которой выполнены блоки, отвечающие за помехоустойчивое кодирование и кодовое разделение каналов. С ПЛИС закодированная информация поступает на драйвер светодиодов. Далее с помощью светодиодов, установленных в фарах автомобилей, осуществляется передача информации.

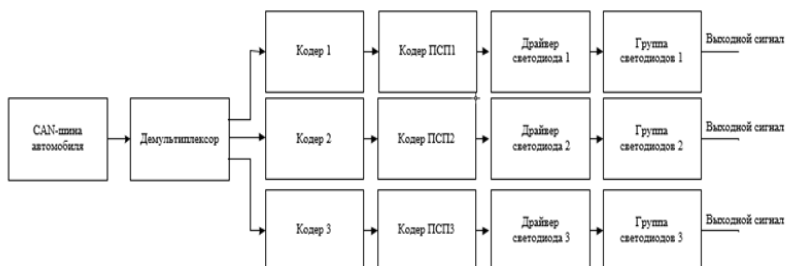


Рис. 1. Передающий модуль подсистемы контроля скорости на базе технологий VLC

Проходя через атмосферу, оптический сигнал поступает на фотодиоды 1-3 приёмного модуля. Электрический сигнал с выхода фотодиодов поступает на согласованные фильтры 1-3, в которых происходит детектирование сложного сигнала. После усиления и очистки от шумов сигнала оцифровывается в преобразователях 1-3. Решающее устройство анализирует данные с трёх каналов и принимает решение о том, какой бит информации был принят.

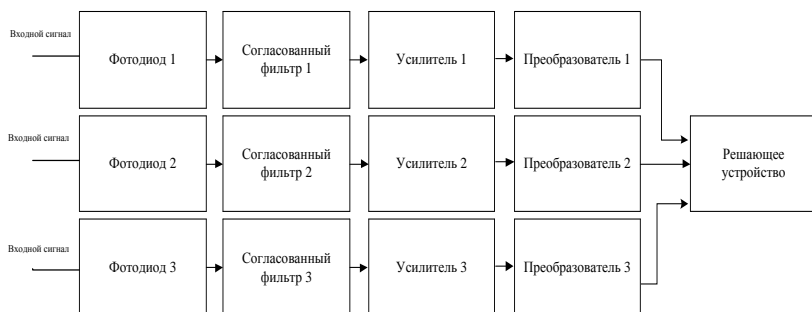


Рис. 2. Приёмный модуль подсистемы контроля скорости на базе технологий VLC

Список литературы

1. Connected Car: V2V, V2I, V2X, V2P, V2G, V2D [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL <http://1234g.ru/novosti/v2v-v2i-v2x-v2p-v2g-v2d-connected-car> - 01.12.2020.
2. Зачиняев Ю.В., Гудкова Ю.А., Штоколов А.А. Гибридная система контроля скорости движения автомобиля на базе технологий VLC и RFID // IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. М.: НИЯУ МИФИ, 2020. С. 625-226.

М.В. БРЕЦЬКО, Я.Е. АКИМОВА, В.В. БРЕЦКО

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

ВОССТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ СПИРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ СВЕТА ПОСЛЕ СЛУЧАЙНЫХ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ

В данной работе показана возможность восстановления спиральных пучков света после прохождения через случайные фазовые искажения. Восстановление основано на цифровом измерении спектра амплитуд и фаз собственных мод с помощью моментов интенсивности высших порядков. Степень корреляции исходного изображения и восстановленного составило $\eta = 0.93$.

M.V. BRETSKO, Ya.E. AKIMOVA, V.V. BRETCKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

RECONSTRUCTION OF SPIRAL LIGHT BEAMS AFTER A RANDOM PHASES PERTURBATION

This paper shows the possibility of reconstructing spiral light beams after passing through random phase perturbations. Reconstruction is based on digital measurement of the spectrum of amplitudes and phases of eigenmodes using higher-order intensity moments. The degree of correlation between the original image and the reconstructed one was $\eta = 0.93$.

Спиральные пучки света притягивают внимание исследователей из различных областей физики и техники не только благодаря их структурной устойчивости, но и их способности переносить без искажений контуры изображений в свободном пространстве, несмотря на то, что они содержат множество стандартных вихревых пучков [1].

В данной работе мы предлагаем провести анализ разрушения спирального пучка в виде формы правильного треугольника за счёт случайных фазовых искажений посредством цифрового измерения спектра амплитуд и фаз собственных мод, и на их основе продемонстрировать возможность восстановления структуры такого пучка.

Для построения спирального пучка с заданным распределением интенсивности в виде правильного треугольника (рис. 1а) мы воспользовались вычислениями (6.13), приведёнными в [2]. В качестве случайных фазовых возмущений использовался SLM-модулятор, на экран которого помещалась фазовая голографическая решётка со случайными

распределением фазы (рис. 1г). Спектры мод (рис. 1д и 1е) измерялись в фокальной плоскости сферической линзы посредством анализа распределения интенсивности $I_{n,\ell}(x,y)$ спирального пучка с модовыми числами (n,ℓ) с помощью моментов интенсивности $J_{p,q}$ [3]. Моменты интенсивности содержат амплитуды $C_{2n+\ell-k,k}$ и фазы β_k пучков Эрмита-Гаусса, и для их нахождения, требуется провести $2(\ell+1)$ вычислений и составить соответствующую систему линейных уравнений [4]. Зная исходные спектры амплитуд и фаз спирального пучка, мы можем восстановить его исходную структуру (рис. 1в). Степень восстановления исходного пучка составляет $\eta = 0.93$.

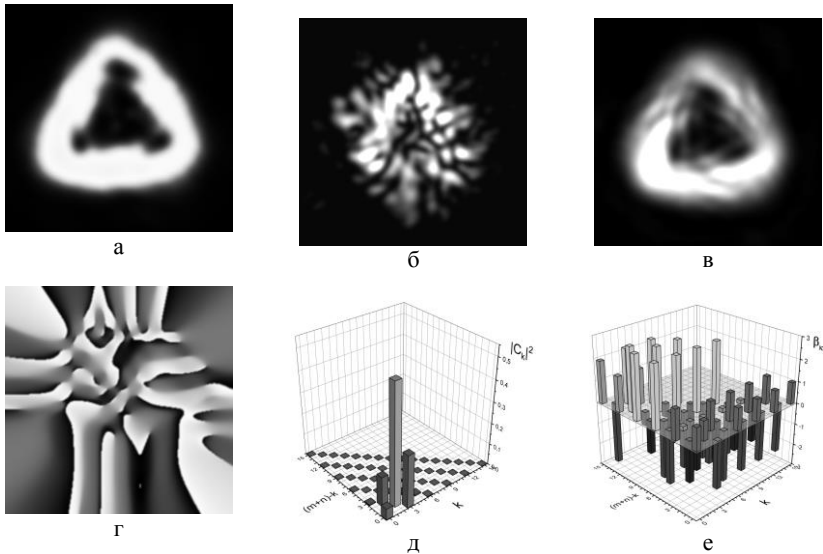


Рис. 1. Исходный спиральный пучок (а); спекл-картина (б); восстановленный спиральный пучок (в); голографическая решётка со случайным распределением фазы (г); спектр квадратов амплитуд (д) и фаз (е)

Список литературы

1. Abramochkin E., Volostnikov V. // Optics Communications. 1993. V. 102. P. 336-350.
2. Abramochkin E., Volostnikov V. Modern optics of Gaussian beams. Moscow, 2010.
3. Volyar A., Bretsko M., et al. // Opt. Lett. 2018. V. 43(22). P. 5635-5638.
4. Volyar A., Abramochkin E., et al. // Applied Optics. 2020. V. 59. P. 7680-7687.

М.Н. КУЛАКОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОДНОПИКСЕЛЬНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ СЖАТОГО ЗОНДИРОВАНИЯ К ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОТЕРЯМ РЕГИСТРИРУЕМОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Методы восстановления с использованием сжатого зондирования (СЗ, «compressive sensing») позволяют регистрировать и реконструировать информацию из её разреженного/сжатого вида. Путем реализации так называемой «однопиксельной камеры» исследована стойкость однопиксельного детектирования с СЗ к потере интенсивности излучения по площади детектора.

M.N. KULAKOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

INVESTIGATION OF SINGLE-PIXEL IMAGING STABILITY ON SPATIAL LOSS OF REGISTERED INTENSITY

Reconstruction methods based on compressive sensing allow registering and recovering information from its sparse or compressed representation. By single-pixel camera implementation, stability of single-pixel imaging to a partial loss of the registered intensity over the detector area has been investigated.

Методы на основе сжатого зондирования (СЗ [1]) применяют для восстановления информации, в том числе при частичной потере данных. Пример СЗ – так называемая «однопиксельная камера», регистрирующая излучение, идущее от объекта и прореженное микрозеркальным модулятором (МЗМ) [2]. На МЗМ, модулирующий излучение за счёт поворота микрозеркал, выводятся бинарные (например, случайные [3]) массивы. При этом стойкость метода по отношению к пространственным потерям сигнала почти не затрагивается в работах или упоминается лишь косвенно, хотя это может обеспечить значительно более широкое применение метода при восстановлении информации, в том числе регистрируемой в динамических и рассеивающих средах. Поэтому цель работы – исследование устойчивости однопиксельного детектирования с СЗ к пространственным потерям регистрируемой интенсивности.

Экспериментально реализовано однопиксельное детектирование и восстановление изображений из набора оптических регистраций при

использовании ограничивающих детектор апертур, имеющих различный размер, форму и соосность положения. Схема установки приведена на рис. 1. На рис. 2 приведены идеальное и некоторые восстановленные изображения для различных апертур [4]. Число регистраций, нормированное на число пикселей исходного идеального изображения для восстановленных изображений с рис. 2 составило 3,7 %. Рис. 2б и 2в соответствуют регистрации интенсивности, в которых остаётся 0,51 и 0,7 долей интенсивности всего светового пятна без апертур соответственно. При 49 % (рис. 2б) потерях пиковое отношение сигнал/шум снизилось на 2,2 дБ, а при 30 % (рис. 2в) - лишь на 0,7 дБ относительно случая без потерь.

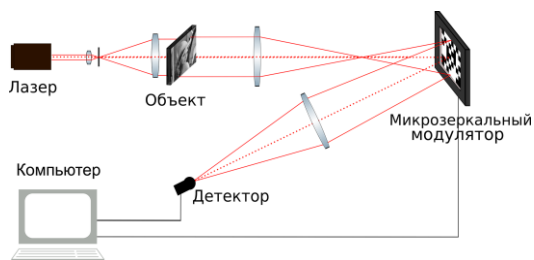


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для регистрации интенсивности

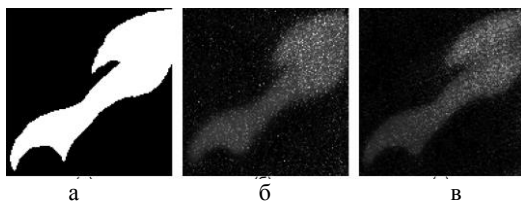


Рис. 2. Исходное (а) и восстановленные изображения (б, в) бинарного объекта

Результаты показывают весьма высокую надежность метода к потерям сигналов в сравнении со стандартной регистрацией цифровыми камерами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 17-07-00829) и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Список литературы

1. Rani M., Dhok S.B., Deshmukh R.B. // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 4875-4894.
2. Edgar M.P., Gibson G.M., Padgett M.J. // Nature Photonics. 2019. V. 13 (1). P. 13-20.
3. Kulakov M.N., Starikov R.S., Cheremkhin P.A. // KnE Energy. 2018. V. 3 (3). P. 509-522.
4. Кулаков М.Н., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Влияние пространственных потерь сигнала, регистрируемого однопиксельным детектором, на качество восстановления изображений объектов // Известия вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 8. С. 692-703.

В.И. БУСУРИН, С.Г. ШТЕК¹, М.А. ЖЕГЛОВ¹, К.А. КОРОБКОВ,
Н.А. КОШЕВАРОВА

*Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)*

¹*Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва*

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ КОМПЕНСАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УСКОРЕНИЯ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ СЧИТЫВАНИЕМ

Разработаны структурная и функциональная схемы компенсационного микро-опто-электромеханического преобразователя ускорения с дифференциальным считыванием. Разработана математическая модель, описывающая статические и динамические характеристики преобразователя. Произведён анализ погрешностей компенсационного преобразователя ускорения.

V.I. BUSURIN, S.G. SHTEK¹, M.A. ZHEGLOV¹, K.A. KOROBKOV,
N.A. KOSHEVAROVA

Moscow Aviation Institute (National Research University)

¹*State Research Institute of Instrument Making, Moscow*

FAULTS ANALYSIS OF THE COMPENSATION ACCELERATION TRANSDUCER WITH DIFFERENTIAL OPTICAL READING

Structural and functional diagrams of a compensation microoptoelectromechanical acceleration transducer with differential reading have been developed. A mathematical model has been developed that describes the static and dynamic characteristics of the transducer. Faults analysis of the compensation acceleration transducer is carried out.

К актуальным прикладным задачам, требующим измерения ускорения, относятся построение бесплатформенных инерциальных навигационных систем и стабилизация конструктивных элементов волновых гироскопов [1]. Предложен компенсационный микро-опто-электромеханический (МОЭМ) преобразователь ускорения с дифференциальным считыванием на основе оптического туннельного эффекта (ОТЭ) [2]. Балочный чувствительный элемент (ЧЭ) преобразователя испытывает изгибные деформации, индуцированные инерционными силами, действующими на него, и модулирует мощность оптического сигнала, позволяя детектировать его положение, косвенно измеряя действующее ускорение. Перемещения свободного края балочного ЧЭ составляют десятки доли

микрометра, что позволяет эффективно измерить их средствами ОТЭ-модулятора. В одну катетную грань призмы полного внутреннего отражения ОТЭ-модулятора вводится коллимированное инфракрасное излучение под углом, близким к критическому, но не превышающим его. Через гипотенузную грань призмы оптическая мощность туннелирует в ЧЭ. Значение оптической мощности отражённого луча детектируется фотоприёмником на второй катетной грани призмы. Использовано дифференциальное включение двух ОТЭ-модуляторов, что позволило уменьшить погрешность нелинейности узла считывания до 2 %.

Использование контура электромагнитной стабилизации положения ЧЭ позволяет расширить диапазон измерений, повысить точностные характеристики преобразователя (статическая ошибка не превышает 0,05 %) и предотвратить механический контакт между оптическими деталями преобразователя. Сигнал от фотоприёмников поступает в блок обработки, который передает информацию на интерфейс, линеаризует зависимость компенсационной силы от напряжения обратной связи и формирует компенсационное напряжение на соответствующем электромагните с учётом закона управления.

Технологические погрешности геометрических параметров ЧЭ, угла ввода излучения, длины волны источника и т.д., оказывают влияние на чувствительность преобразователя. Погрешности, обусловленные внешними факторами, например изменением температуры или наличием поперечного ускорения, влияют на статическую ошибку преобразователя. Погрешности зазора между ЧЭ и корпусом влияют на динамические характеристики.

Предложен алгоритм функционирования блока обработки, позволяющий стабилизировать положение ЧЭ и демпфировать его колебания. Проведено сравнение динамических свойств разомкнутой системы и системы с электромагнитной обратной связью. Разработаны трёхмерные модели элементов преобразователя и его общего вида. Произведено исследование влияния погрешностей узлов на характеристики преобразователя ускорения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Busurin V.I., Zheglov M.A., Shleenkin L.A., Korobkov K.A., Bulychev R.P. Development of an algorithm to sup-press frequency splitting of an axisymmetric resonator of a wave solid-state gyroscope with optical detection // Measurement Techniques. 2020. V. 62. No. 10. P. 879-884.
2. Busurin V.I., Korobkov K.A., Shleenkin L.A., Makarenkova N.A. Compensation linear acceleration converter based on optical tunneling // 27th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, 2020. P. 1-4.

Т.А. ЕФИМОВ, Е.П. ДАЦ¹, Е.А. РАССОЛОВ, М.С. МАЛОХАТКО²

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

¹*Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток*

³*Южный федеральный университет, Таганрог*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МИКРОПЕРФОРИРОВАННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПРИЁМНИКА

Произведён расчёт модели упругих колебаний кремниевой мембраны размером $8,4 \times 8,4 \times 0,025$ мм в жидкой среде, с использованием программного пакета Comsol Multiphysics. Для построения модели был использован встроенный модуль среды Acoustic Solid Interaction, Frequency Domain. Исследовано влияние микроперфорации на резонансную частоту и амплитуду колебаний мембраны.

Т.А. EFIMOV, E.P. DATS¹, E.A. RASSOLOV, S.V. MALOKHATKO²

Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok

¹*Institute of Applied Mathematics FEB RAS, Vladivostok*

²*Southern Federal University, Taganrog*

MODELING OF A MICRO-PERFORATED MEMBRANE VIBRATIONS FOR A HYDROACOUSTIC RECEIVER

The model of elastic vibrations of a silicon membrane with the size of $8.4 \times 8.4 \times 0.025$ mm in a liquid medium calculated using the Comsol Multiphysics software. The built-in module of the Acoustic Solid Interaction, Frequency Domain environment used for building the vibrational model. The influence of microperforation on the resonant frequency and amplitude of membrane oscillations was study.

В настоящей работе выполнено моделирование и оптимизация геометрии сверхтонких мембран с микроперфорацией с целью достижения максимальной чувствительности оптического гидрофона, представленного в работе [1].

Расчётная область ограничена сферой радиусом 24 см, границы которой являются идеально согласованным слоем (PML – perfectly matched layer). В качестве акустического источника в модели использовался точечный источник, находящийся на расстоянии 2 см от центра мембраны. Такое расположение излучателя (рис. 1) позволяет получить малую кривизну волнового фронта акустического излучения в плоскости мембраны, при малом размере расчётной области. В модели

использовались следующие параметры: мощность акустического поля – 0,01 Вт; частота акустического воздействия – 100 - 2000 Гц; плотность материала мембраны – 2,3 г/см³; модуль Юнга – 170 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,28; мембрана имеет прямоугольную форму 8,4 × 8,4 мм, толщину 25 мкм; размер основания мембраны – 20 × 20 мм с толщиной 250 мкм.

Моделирование производилось для разного положения (равномерно по площади мембраны; по периметру вдоль линий крепления мембраны), количества (от 4 до 40) и размера отверстий (0,1 - 1 мм) в мембране (рис. 2). Для каждого случая получено положение и амплитуда резонансного пика, соответствующего первой моде колебаний мембраны.

В ходе моделирования установлено, что наибольшая амплитуда колебаний (0,65 мкм) достигается при перфорации мембраны отверстиями (с диаметром 200 мкм) вдоль линий крепления мембраны к основанию. Показано, что благодаря микроперфорации мембраны к подложке можно достичь увеличения чувствительности.



Рис. 1. Взаимное расположение источника акустических колебаний и мембраны

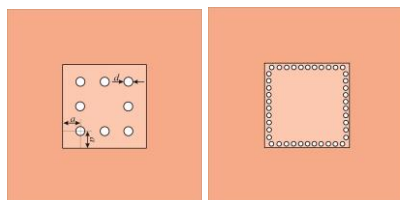


Рис. 2. Различные способы перфорации мембраны, использованные при моделировании

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00323).

Список литературы

1. Romashko R.V., Kulchin Yu.N., et al. // Quantum Electronics. 2016. V. 45 (3). P. 277.

В.И. БУСУРИН¹, С.О. ВАСЕЦКИЙ^{1,2}, С.Г. ШТЕК², М.А. ЖЕГЛОВ²

¹*Московский авиационный институт*

(национальный исследовательский университет)

²*Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКОГО ТУННЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА

Приведены результаты экспериментального исследования характеристик преобразователя наноперемещений на основе оптического туннельного эффекта. Определён диапазон изменения ширины воздушного зазора, где функция преобразования имеет квазилинейный характер и наибольшую чувствительность.

V.I. BUSURIN¹, S.O. VASETSKIY^{1,2}, S.G. SHTEK², M.A. ZHEGLOV²

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

²*State Research Institute of Instrument Making, Moscow*

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE CHARACTERISTICS OF THE DISPLACEMENT TRANSDUCER BASED ON THE OPTICAL TUNNELING EFFECT

The results of an experimental research of the characteristics of a nanodisplacement transducer based on the optical tunneling effect are presented. The range of variation of the width of the air gap is determined, where the transfer function has a quasi-linear character and the highest sensitivity.

Различные преобразователи на основе оптического туннельного эффекта имеют высокую чувствительность к наноперемещениям, что позволяет уменьшать габариты устройств и вес, а использование чувствительных элементов и опорных конструкций, изготовленных из кварца, позволяет минимизировать температурные погрешности и повысить прочность. Целью настоящей работы является исследование зависимости туннелируемой оптической мощности из призмы полного внутреннего отражения в одномодовое оптоволокно через воздушный зазор. Одним из факторов, определяющих оптическую мощность, проходящую через туннельный зазор, является отражательная способность [1], зависящая от ширины воздушного слоя, а также угла падения на границу раздела двух сред, для выполнения условия полного внутреннего отражения [2].

В результате проведённых серий экспериментов были получены средние значения оптической мощности, прошедшей в одномодовое оптоволокно через изменяемый туннельный зазор в виде воздушного слоя. При удалении оптоволокна на расстояние длины волны источника излучения, остаётся только шумовая составляющая 6.14 нВт, а при максимальном приближении, соответствующем механическому контакту мощность увеличивается до 12.6 нВт. Общий перепад мощности составил 3 дБ. Малые значения оптической мощности обусловлены малой числовой апертурой и размерами оптоволокна. Зависимость мощности от величины зазора имеет возрастающий вид при уменьшении ширины воздушного слоя до механического соприкосновения. При этом квазилинейная зависимость между шириной такого зазора и проходящей оптической мощностью наблюдается в двух диапазонах от 80 до 210 нм и от 262 до 366 нм при длине волны источника излучения 632,8 нм. Чувствительность к наноперемещениям в первом диапазоне составила 0,0047 Вт/м, а во втором – 0,034 Вт/м. Варьирование зазором происходило с помощью пьезоактюатора с предварительным выводом в рабочий температурный режим и управлением с помощью напряжения с шагом 26 мВ.

Для достижения высокой чувствительности преобразователя наноперемещений была выявлена необходимость строгого контроля угла падения оптического излучения, так как изменение угла в пределах $\pm 0,4^\circ$ вносит существенное влияние на характеристики микро-опто-электромеханических систем (МОЭМС) [3]. Также следует контролировать плоскопараллельность рабочих поверхностей считывания информации, которая может быть достигнута при изготовлении устройств технологическими процессами микрообработки. При формировании рабочих зазоров для обеспечения высокой чувствительности в МОЭМС целесообразно использовать метод реактивного ионного травления.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность измерения наноперемещений, индуцированных инерциальными смещениями воспринимающих элементов преобразователей угловых скоростей и акселерометров в микро-опто-электромеханических системах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-08-00108).

Список литературы

1. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1983.
3. Бусурин В.И., Фам А.Т. Микрооптоэлектромеханический преобразователь угловых скоростей на основе оптического туннельного эффекта // Автометрия. 2016. № 2.

Н.В. СУЕТИН

Российский университет дружбы народов, Москва

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА МАЛЫХ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ПОСТРОЕННОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК

Исследованы датчики малых угловых перемещений и колебаний объектов, которые построены с применением системы из двух фазовых дифракционных решёток (ДР). Приведены схема датчика, результаты исследований рабочих характеристик и оценка чувствительности датчика. На экспериментальных образцах датчиков чувствительность при регистрации угловых колебаний составила 10^{-5} радиан.

N.V. SUETIN

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

CHARACTERISTICS OF A SMALL ANGULAR DISPLACEMENT SENSOR CONSTRUCTED USING A SYSTEM OF TWO PHASE DIFFRACTION GRATINGS

Sensors of small angular displacements and oscillations of objects constructed using a system of two phase diffraction gratings located at some distance from each other are investigated. The scheme of the sensor, and the results of experimental studies its characteristics are presented. Experimental sensitivity for recording angular vibrations was 10^{-5} radians.

При прохождении оптического пучка через систему из двух параллельных фазовых дифракционных решёток (ДР) мощность в дифракционных порядках зависит от взаимного положения дифракционных решёток. При смещении одной из ДР относительно другой в направлении поперёк штрихов решётки изменяется мощность излучения в дифракционных порядках. На основе этой оптической схемы может быть построен высокочувствительный датчик малых угловых перемещений, схема которого изображена на рис. 1. При повороте блока решёток в направлении Θ происходит смещение штрихов решёток, мощность в первых порядках дифракции изменяется по гармоническому закону, мощность в нулевом порядке дифракции – периодически, с большой амплитудой. Графики зависимости мощности в нулевом и

первых порядках дифракции от смещения решёток приведены на рис. 2. Подробные теоретические и экспериментальные исследования приведены в [1].

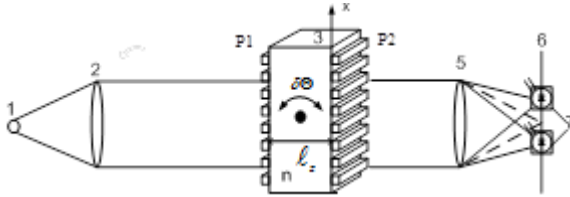


Рис. 1. Схема датчика малых угловых перемещений с использованием блока решёток: P1, P2 – дифракционные решётки, 1 – полупроводниковый лазер, 2 – коллиматор, 3 – блок решёток, 4 – шуп, 5 – линза, 6 – диафрагма, 7 – фотодетекторы

Чувствительность датчика определяется шумами лазера и фотодетектора, а также сейсмическими шумами. Теоретическая чувствительность системы из двух решёток с периодом 100 мкм, удалённых на расстояние 13 мм в полосе частот 100 Гц составляет 10^{-8} рад. Экспериментальная чувствительность схемы при тех же параметрах составила 10^{-5} рад.

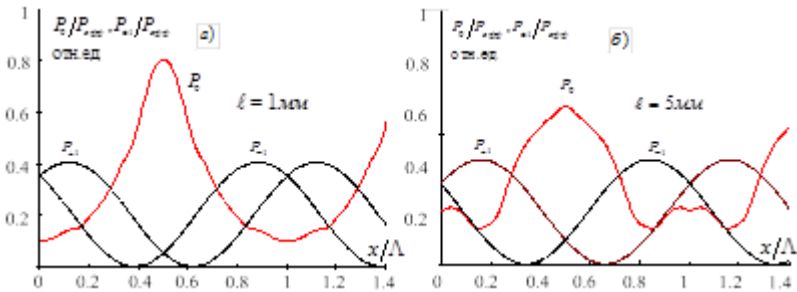


Рис. 2. Зависимости мощности излучения в нулевом и первых порядках дифракции от смещения одной из ДР относительно другой, для ДР с глубиной ПФМ $\Phi_M = \pi/4$ при расстояниях между решётками: 1 мм (а), 5 мм (б)

Список литературы

1. Комоцкий В.А., Соколов Ю.М // Вестник РУДН. Сер. Физика. 2006. № 1. С. 90-95.
2. Комоцкий В.А., Корольков В.И., Соколов Ю.М. //Автометрия. 2006. Т. 42. № 6. С. 105-112.

И.Н. ПАВЛОВ, М.В. ЦВЕТКОВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

В работе сделана попытка рассмотреть возможные пути повышения чувствительности метода нарушенного полного внутреннего отражения для расширения области его применения. Рассмотрены такие способы, как снижение влияния шумов, учёт поляризационных эффектов, использование интерференции, использование многократного полного внутреннего отражения, использование многослойного диэлектрического напыления и другие. Проведены эксперименты по измерению чувствительности имеющейся экспериментальной установки, работающей на основе данного метода, а также выявлены наиболее перспективные направления дальнейшей работы.

I.N. PAVLOV, M.V. TSVETKOV

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

POSSIBLE WAYS TO INCREASE SENSITIVITY OF A FRUSTRATED TOTAL INTERNAL REFLECTION METHOD

An attempt is made in this work to consider possible ways to increase sensitivity of the frustrated total internal reflection method in order to expand the area of its application. Such ways were considered as reducing the influence of noise, taking into account polarization effects, using interference, using multiple total internal reflection, using multilayer dielectric coating, and others. The experiments were carried out to measure the sensitivity of the existing experimental setup operating on the basis of this method, and the most promising areas of further work were identified.

Явление полного внутреннего отражения (ПВО) известно очень давно и широко используется для измерения показателя преломления различных веществ с достаточно хорошей точностью. Это явление лежит в основе развиваемого в данной работе метода нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), который позволяет визуализировать и измерять распределение показателя преломления в тонком пограничном слое жидкости толщиной несколько сотен нанометров за счёт использования широкого коллимированного лазерного пучка. Такая модификация метода НПВО была предложена в работе [1] и с тех пор непрерывно развивается. Для дальнейшего расширения областей применения метода необходимо

повысить чувствительность ранее созданной экспериментальной установки к изменению показателя преломления исследуемой жидкости. Для этого был проведён обзор литературы по соответствующей теме и в результате него были выявлены следующие возможные способы увеличения чувствительности.

Одним из очевидных способов увеличения чувствительности является подавление шумов. Это можно сделать двумя путями: избавление от спекл-структуры с помощью подвижного (вращающегося или вибрирующего) экрана или фильтрация полученных экспериментальных изображений с помощью цифровой обработки. Кроме того, эти пути не являются взаимоисключающими, поэтому их можно использовать вместе.

Другим способом является использование разности набега фаз при отражении от сред с разными показателями преломления. Однако проведённый расчёт показал, что это не позволит существенно повысить чувствительность установки. Третий рассмотренный способ - использование интерференции опорного пучка с пучком, отражённым от исследуемой среды. При этом отклонение показателя преломления будет выражаться в изменении видности интерференционной картины. Однако, проведённые расчёты показали, что и в этом случае контраст видностей получается примерно равным контрасту интенсивностей и не даёт существенного прироста чувствительности.

Модификация метода с использованием многократного НПВО [2] позволяет повысить чувствительность в несколько раз, однако это происходит за счёт потери возможности визуализации распределения показателя преломления в одном из направлений, поэтому её можно использовать только в ограниченном количестве случаев. Ещё одним рассмотренным способом является использование многослойного диэлектрического напыления на рабочую поверхность измерительной призмы. Чередование слоёв с заранее рассчитанными под конкретные условия показателями преломления позволяет увеличить крутизну изменения коэффициента отражения вблизи критического угла ПВО, а значит, и чувствительность установки, однако требует изготовления дорогостоящей призмы под каждый конкретный эксперимент.

Список литературы

1. Pavlov I.N., Rinkevichyus B.S. Near-Wall liquid flows visualization on frustrated total internal reflection // *Optical Memory and Neural Networks*. 2009. V. 18. No. 4. P. 322-327.
2. Страхов С.Ю., Перхина Е.В. Определение чувствительности метода нарушенного полного внутреннего отражения применительно к задаче обнаружения малых количеств веществ на предметах // *Оптический журнал*. 2010. №77. С. 55-59.

Р.В. РОМАШКО, М.Н. БЕЗРУК, Д.А. БОБРУЙКО

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В КОНСТРУКЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Разработана и экспериментально реализована 30-канальная адаптивная волоконно-оптическая измерительная система, которая обеспечивает регистрацию распределения слабых акустических полей. Проведены экспериментальные исследования разработанной измерительной системы в задаче регистрации слабого акустического поля в конструкционном материале, имеющем конструкционные дефекты.

R. V. ROMASHKO, M. N. BEZRUK, D. A. BOBRUYKO

¹Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok

REGISTRATION OF THE ACOUSTIC FIELD IN THE STRUCTURAL MATERIAL BY USING AN ADAPTIVE FIBER OPTIC TOMOGRAPHIC SYSTEM

A multichannel adaptive fiber-optic measuring system, which provides registration of the distribution of weak acoustic fields is developed and experimentally implemented. Experimental studies of the developed measuring system in the problem of registering a weak acoustic field in a structural material with structural defects is carried out.

В настоящей работе представлен результат апробации 30-канальной адаптивной волоконно-оптической измерительной системы в задаче регистрации акустического поля, сформированного в полимерной плите из экструзионного пенополистирола XPS, имеющей конструкционные дефекты. В основе системы лежит 30-канальный адаптивный фазовый демодулятор, в котором динамические голограммы мультиплексируются в фоторефрактивного кристалле CdTe (рис. 1) [1]. В качестве чувствительных элементов системы использованы 30 многомодовых волоконных световодов. Акустическое поле возбуждалось в плите электродинамической головкой, расположенной над геометрическим центром плиты, на которую подавался гармонический сигнал, что приводило к формированию в плите акустического поля. Волоконные световоды размещались на поверхности плиты параллельными линиями в

двух ортогональных направлениях, выполняя процедуру томографического сканирования плиты в двух направлениях [2]. Механические деформации, передаваемые световодам поверхностью объекта, возникающие под воздействием зондирующего акустического поля, вносили фазовую модуляцию в распространяющееся по ним лазерного излучения, которая преобразовывалась в модуляцию интенсивности с помощью адаптивного фазового демодулятора. В плите (размеры $40 \times 40 \times 5 \text{ см}^3$) были сделаны 4 сквозных отверстия диаметром 12 см, имитирующие конструкционные дефекты, которые располагались симметрично относительно центра плиты. На рис. 2 показана восстановленная с применением томографических методов пространственное распределение акустического поля на поверхности плиты, определена локализация группы дефектов. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00323).

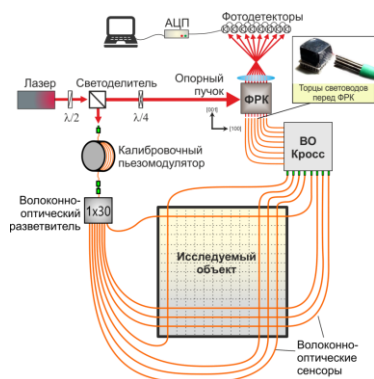


Рис. 1. Схема 30-канальной волоконно-оптической измерительной системы

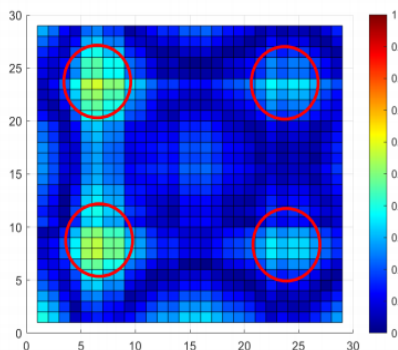


Рис. 2. Томографическая реконструкция пространственного распределения акустического поля на поверхности плиты при наличии в ней 4 отверстий (отмечены красными окружностями)

Список литературы

1. Ромашко Р.В. и др. Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 6. С. 551-556.
2. Кульчин Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы. М.: Физматлит, 2001.

А.В. ВЕДЯШКИНА, И.Л. РАСКОВСКАЯ, И.Н. ПАВЛОВ
Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КАУСТИК
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА В ЖИДКОСТЯХ**

Исследован и апробирован метод каустик оптического излучения для визуализации динамики и количественной диагностики параметров пограничных слоёв жидкости. Создана экспериментальная установка для исследования процессов взаимодиффузии с помощью каустик лазерного излучения, приведены результаты экспериментов. Показана возможность применения метода каустик для определения краевого угла смачивания по рефракционному изображению, полученному при зондировании капли, лежащей на прозрачной подложке, широким коллимированным лазерным пучком.

A. V. VEDYASHKINA, I. L. RASKOVSKAYA, I. N. PAVLOV
National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

**APPLICATION OF THE CAUSTIC METHOD
FOR RESEARCH THE PROCESSES OF HEAT
AND MASS TRANSFER IN LIQUIDS**

The method of optical radiation caustics for dynamics visualization and quantitative diagnostics of boundary layers liquid parameters was investigated and tested. An experimental setup was created to research interdiffusion processes using laser caustics, and the results of experiments are presented. Possibility of using the caustic method for determining the contact angle of wetting from refractive images, which were obtained by probing a drop lying on a transparent glass with a wide collimated laser beam, is shown.

Исследование процессов тепло- и массопереноса является важной научной и производственной задачей, в частности, имеет большое значение бесконтактный непрерывный контроль параметров пограничных слоев в жидкостях. Метод каустик оптического излучения, основанный на регистрации геометрических параметров каустических поверхностей, формируемых световыми лучами в результате зондирования неоднородной среды, хорошо зарекомендовал себя в решении задач определения параметров оптически неоднородных сред [1, 2].

В данной работе расширена область применения метода каустик, показана возможность применения метода для определения параметров диффузионного слоя жидкости по положению каустик лазерного излучения, разработан алгоритм обработки экспериментальных рефракционных картин, позволяющий восстанавливать распределение показателя преломления в диффузионном слое и определять коэффициент диффузии посредством косвенных измерений. Экспериментальная установка состоит из лазера, оптической системы формирования плоского лазерного пучка, кюветы, в которой создан диффузионный слой, цифровой фотокамеры. Рефракционная картина и графики зависимости коэффициента диффузии от времени для системы вода – раствор электролита для различных концентраций, полученные при анализе геометрических параметров каустических поверхностей, приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

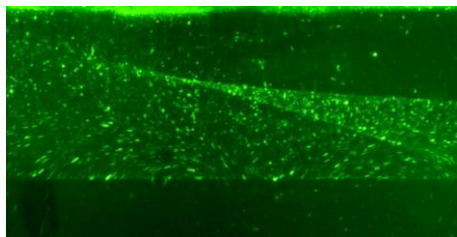


Рис. 1. Каустики лазерного излучения в диффузионном слое жидкости

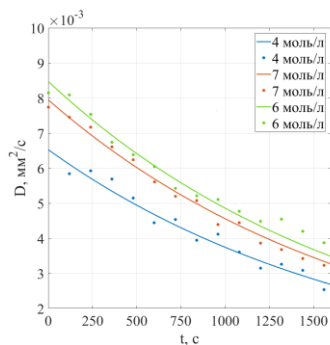


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента диффузии от времени

Также в работе метод каустик применён для определения температуры поверхности объекта, создающего температурное поле, в прозрачной жидкости и мониторинга краевого угла смачивания, изменяющегося в процессе испарения капли жидкости, лежащей на прозрачной подложке.

Список литературы

1. Vedyashkina A.V., Rinkevichyus B.S. Investigation of heat and mass transfer processes by the method of structured laser radiation caustics // Journal of Physics: Conference Series. 2017.
2. Ведяшкина А.В., Ринкевичюс Б.С., Павлов И.Н., Расковская И.Л., Толкачев А.В. Оптико-электронный комплекс для исследования процессов тепло- и массообмена лазерным бесконтактным методом // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 3. С. 43-53.

Я.Е. АКИМОВА, М.В. БРЕЦЬКО, В.В. БРЕЦКО

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

ЦИФРОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУД РАДИАЛЬНЫХ МОД ПУЧКОВ ЛАГЕРРА-ГАУССА ПОСЛЕ ДИФРАКЦИИ НА КРУГЛОМ ОТВЕРСТИИ

Представлена новая методика цифровой сортировки радиальных мод Лагерра-Гаусса (ЛГ) при постоянном топологическом заряде, возникающем в результате возмущения одиночных пучков ЛГ круглой диафрагмой. Методика основана на цифровом анализе моментов интенсивности высших порядков. Диафрагма с круглым отверстием вызывает появление набора вторичных мод ЛГ с различными радиальными числами, которые характеризуются амплитудным спектром. Цифровой амплитудный спектр позволяет восстановить реальные моды ЛГ и найти меру неопределённости, вносимой возмущением, посредством информационной энтропии. Измерения показали, что степень корреляции отсортированных пучков составляет $\eta = 0.92$.

Ya.E. AKIMOVA, M.V. BRETCKO, V.V. BRETCKO

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

DIGITAL METHOD FOR MEASURING THE AMPLITUDES OF THE RADIAL MODES OF LAGUERRE-GAUSS BEAMS AFTER DIFFRACTION BY A ROUND HOLE

We have presented a new technique for digital sorting of radial Laguerre-Gauss (LG) modes at a constant topological charge arising from the perturbation of single LG beams by a circular aperture. The technique is based on a digital analysis of the moments of intensity of higher orders. A diaphragm with a round aperture causes the appearance of a set of secondary LG modes with different radial numbers, which are characterized by an amplitude spectrum. The digital amplitude spectrum allows one to reconstruct the real LG modes and find the measure of the uncertainty introduced by the disturbance using information entropy. Measurements have shown that the degree of correlation of the sorted beams is $\eta = 0.92$.

Одной из главных проблем обработки информационных данных для вихревой оптической связи является сортировка комбинированных вихревых пучков по радиальным и азимутальным индексам. На данный момент существует два основных подхода для решения этой проблемы: первый основан на использовании дифракционных оптических элементов в сочетании с интерферометрами и модуляторами света [1]. Второй

предлагает использовать цифровую сортировку мод на основе моментов интенсивности высших порядков [2]. Стоит отметить, что второй метод реализован только для сортировки лазерных пучков по их азимутальному индексу.

В связи с этим целью данной работы является расширение цифровой методики сортировки мод Лагерра-Гаусса (ЛГ) по радиальному индексу, используя моменты интенсивности.

Модель сортировки мод ЛГ основана на возмущении лазерного пучка на обычной диафрагме с жёсткими краями и круглым отверстием (рис. 1а). Возмущение пучка приводит к широкому спектру вторичных радиальных мод ЛГ. Анализ распределения интенсивности возмущённого пучка выполняется в фокальной плоскости сферической линзы с помощью моментов интенсивности, записанных в виде

$$J_{p,q} = \int_{\square^2} M_{p,q}(r, \varphi) \mathfrak{I}_{m,n}(r) dS, \quad (1.1)$$

где $M_{p,q}(r, \varphi)$ является функцией моментов интенсивности, $p, q = 0, 1, 2, \dots$, $\mathfrak{I}_{p,q}(r)$ – распределение интенсивности. Цифровой амплитудный спектр (рис. 1б) позволяет восстановить реальные моды ЛГ и найти меру неопределённости, вносимой возмущением, посредством информационной энтропии (рис. 1в) [3]. Степень восстановления исходного пучка составляет $\eta = 0.92$.

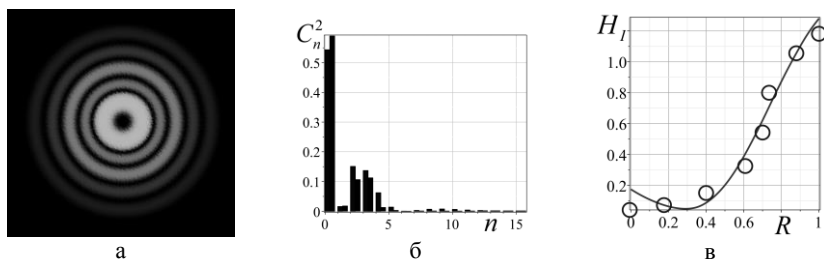


Рис. 1. Пучок Лагерра-Гаусса (а); спектр амплитуд (б); график информационной энтропии (в)

Список литературы

1. Zhou Y., et al. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119.
2. Воляр А.В., Брецько М.В. и др. // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. С. 517-527.
3. Yu F.T.S. // New York: Marcel Dekker, Inc., 2000.

З.А. ЗАБАЛУЕВА, О.И. КОТОВ, О.Ю. ВЕЛЮХОВА, Е.Н. ВЕЛИЧКО
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ
И ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ
ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ**

В работе представлена схема разработанного кросскорреляционного спектрометра для оценки размера частиц в жидких дисперсных средах методами автокорреляции и взаимной корреляции, а также полученные с помощью этого спектрометра корреляционные функции для монодисперсных водных суспензий с частицами известных размеров. Произведённая оценка размеров частиц показала, что оба метода позволяют приближённо вычислить размеры частиц.

Z.A. ZABALUEVA, O.I. KOTOV, O.Yu. VELUKHOVA,
E.N. VELICHKO
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

**COMPARISON OF AUTOCORRELATION
AND CROSS-CORRELATION METHODS
FOR ESTIMATING PARTICLE SIZES**

The paper presents a scheme of a developed cross-correlation spectrometer for estimating the size of particles in liquid dispersed media by autocorrelation and cross-correlation methods, as well as the correlation functions obtained with this spectrometer for monodisperse aqueous suspensions with particles of known sizes. The evaluation of the particle sizes showed that both methods can distinguish samples with particles of different sizes.

Кросскорреляционный спектрометр предназначен для оценки размера частиц в жидких дисперсных средах методом кросс-корреляции [1]. Принципиальная схема спектрометра представлена на рис. 1.

Лазерное излучение с помощью светоделителя и зеркала делится на два равных пучка, которые фокусируются собирающей линзой внутри кюветы с образцом. Два оптических волокна регистрируют интенсивность рассеяния в двух точках спекл-поля под углом 90° к падающим пучкам. Оптические сигналы преобразуются в электрические посредством ФЭУ и оцифровываются аналого-цифровой платой, поступая затем на компьютер. Для увеличения отношения сигнал-шум перед оптическим волокном была помещена собирающая цилиндрическая линза.

На рис. 2 представлены полученные с помощью кросс-корреляционного спектрометра автокорреляционные и взаимные корреляционные функции для монодисперсных водных суспензий с латексными микросферами двух разных диаметров: 60 нм и 100 нм. Чёрными линиями показаны проекции на оси точек, соответствующих полуширине корреляционных функций. Для каждого образца полуширина автокорреляционной и взаимной корреляционной функции практически одинакова, что является критерием схожести результатов, получаемых двумя методами.

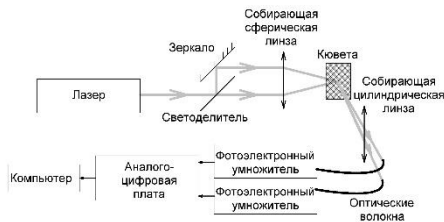


Рис. 1. Схема кросс-корреляционного спектрометра

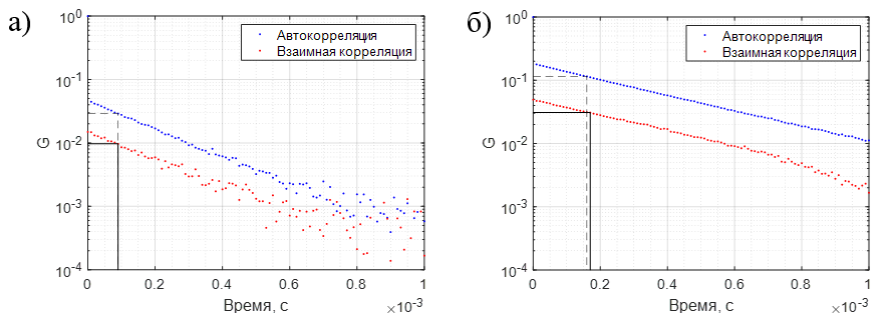


Рис. 2. Экспериментальные корреляционные функции для водных суспензий латексных микросфер диаметром 60 нм (а); 100 нм (б)

Была произведена аппроксимация экспериментальных зависимостей экспоненциальными кривыми вида $G(\tau) = Ae^{2\tau/\tau}$, где τ – время задержки, а $G(\tau)$ – автокорреляционная или взаимная корреляционная функция. В результате оценочных расчётов были получены размеры частиц 70 нм для одного образца обоими методами, а для другого образца 128 нм методом автокорреляции и 129 нм методом кросс-корреляции.

Список литературы

1. Zabalueva Z.A // J. Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1326 (1). P. 1-158.

Б.В. СОКОЛЕНКО, Н.В. ШОСТКА, Д.А. ПОЛЕТАЕВ
Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь

МЕТОД БЕСКОНТАКТНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ ПРОФИЛОМЕТРИИ НА ОСНОВЕ МАССИВА ВИХРЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ

В работе рассматривается эволюция распространения массива вихревых пучков в контексте их возможного применения для бесконтактной прецизионной оптической профилометрии оптически гладких поверхностей с нанометровым разрешением.

B.V. SOKOLENKO, N.V. SHOSTKA, D.A. POLETAEV
V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol

NON-CONTACT INTERFERENCE PROFILOMETRY BASED ON AN ARRAY OF VORTEX OPTICAL BEAMS

We consider evolution of propagation of an array of vortex beams in the context of their application for non-contact precision optical profilometry of optically smooth surfaces with nanometer resolution..

Практическое применение сингулярных пучков в вихревой сканирующей оптической микроскопии позволяет изучать, например, геометрию поверхности и оптическую плотность образца путем анализа сингулярного фазового преобразования [1], которое зависит от характеристик падающего пучка и апертуры оптических систем [2]. В работах [3, 4] авторами продемонстрировали новое решение для визуализации и характеристики микроструктур, называемое оптическим вихревым сканирующим микроскопом, в котором образец сканируется движущимся вихрем. В данной статье мы развиваем ранее предложенный подход, используя суперпозицию пары противоположно заряженных вихрей, дополняя его применением упорядоченной структурой симметричного массива.

Для выделения фазы из сложного распределения интенсивности суперпозиции вихревых массивов был использован метод определения угла поворота φ для каждого «двухлепесткового» пучка (рис. 1). Сделав один полный оборот, картина интенсивности совпадает сама с собой, когда геометрическая разность хода равна длине волны источника

монохроматического света кратна λ . Отметим, что пространственное наложение поля при повороте самого на себя дважды совпадает для топологических зарядов $l = |1|$ из-за особенностей симметрии.

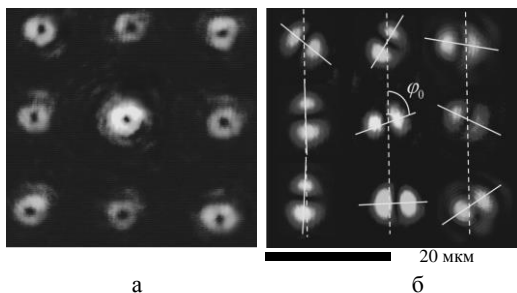


Рис. 1. Сагиттальный срез вдоль оси распространения пучка (а), поперечное распространение интенсивности и интерференцией с опорным пучком (б)

Самый простой способ быстрого и не требующего времязатратных вычислений анализа – это прямое использование изображения, регистрируемого цифровой камерой с минимальными настройками и преобразованиями. Для этого предлагается использовать суперпозицию высокочувствительных зондирующих вихревых пучков с опорным, содержащим сингулярность противоположного знака. Метод определения угла поворота «двухлепесткового» пучка как интерференционной картины достаточно прост. Приложение постобработки определяет центр тёмной полосы между двумя лепестками максимальной интенсивности, через которую проводится линия, как показано на рис. 1б, относительно которого определяется вращение аналогично построенной линии следующей интерференционной картины, когда разность оптических путей мешающих лучей изменяется в соответствии с возвышением поверхности образца. Такой же процесс оценки угла применяется к каждому пучку в массиве.

Представленное в настоящей работе исследование было поддержано в рамках проекта, поддержанного РНФ № 20-72-00065.

Список литературы

1. Szatkowski M., et al. // Laser Beam Shaping XV. 2014. V. 9194. P. 91941D.
2. Augustyniak I., et al. // Applied Optics. 2012. V. 51(10). P. 117-124.
3. Popiolek-Masajada A., et al. // Optics and Lasers in Engineering. 2014. V. 55.
4. Wojnowski D., et al. // Optics Letters. 2014. V. 39(1). P. 119.

Д.Г. ДЕНИСОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ СЪЁМА
ОПТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА
ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ
КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДЕТАЛИ**

Рассмотрены особенности технологических процессов управления формообразованием оптических поверхностей крупногабаритных плоских деталей на этапах шлифования и полирования на современных станках непрерывного формообразования полноразмерным инструментом. Дано обоснование структуры многофакторной математической модели процессов шлифования и полирования плоских оптических поверхностей. Приведён анализ влияния технологических факторов процессов обработки поверхностей плоских оптических деталей на функцию съёма оптического материала модели химико-механического метода обработки (CMP – chemical mechanical polishing).

D.G. DENISOV

Bauman Moscow State Technical University

**ANALYSIS OF THE NUMERICAL SOLUTION
OF THE EQUATION OF DETACHMENT OF THE OPTICAL
MATERIAL IN THE FORMATION OF A PLANE SURFACE
OF A LARGE-SIZED OPTICAL PART**

The features of technological processes of control over the shaping of optical surfaces of large-sized flat parts at the stages of grinding and polishing on modern machines of continuous shaping with a full-size tool are considered. The substantiation of the structure of the multifactorial mathematical model of the processes of grinding and polishing of flat optical surfaces is given. The analysis of the influence of technological factors of surface processing of flat optical parts on the function of removing the optical material of the model of the chemical-mechanical processing method is given. (CMP - chemical mechanical polishing).

На сегодняшний день в оптических технологиях особый интерес представляет научная задача разработки единой математической модели процессов обработки плоских крупногабаритных оптических поверхностей, учитывающей множество физических, химических, механических и технологических факторов, с целью реализации управляемого автоматизированного процесса обработки высокоточных

оптических деталей, исключаяющей, в перспективе, человеческие факторы, трудозатраты и ресурсы. В качестве математической модели [1], позволяющей реализовывать процесс управления функцией съёма материала с поверхности оптической детали предложено и проанализировано следующее выражение

$$q(\eta, \bar{S}_r, e, K, U_n) = K \cdot n \cdot \bar{P}_r \cdot \bar{\delta}_r \cdot \bar{V}_r^{ому} \cdot \bar{t}_r, \quad (1)$$

где h – коэффициент заполнения наклеенной планшайбы (верхнего звена) заготовками оптических деталей; \bar{S}_r – коэффициент покрытия рабочей зоной инструмента зоны обработки деталей; e – эксцентриситет осей верхнего и нижнего звеньев; K – технологический параметр, зависящий от физико-химических процессов обработки, кинематических параметров и режимов шлифования и полирования, адиабатических характеристик окружающей среды (температуры, давления), U_n – параметры управления процессом формообразования, n – число циклов обработки, \bar{P}_r – среднее рабочее давление или его среднеквадратическое значение в зоне r приходящееся на её усреднённую площадь $\bar{\delta}_r$ за временной цикл T ; $\bar{V}_r^{ому}$ – модуль среднего значения вектора относительной линейной скорости в зонах r за временной цикл T (скоростной коэффициент); \bar{t}_r – среднее рабочее время, (среднее значение времени обработки зон r , взятое за временной цикл T). Параметр K в (1) при моделировании задан случайным образом, на практике задача определения данного параметра является сложной и неоднозначной, требующей учёта влияния экспериментальных данных многофакторности рассматриваемой математической модели. Для определения параметра K в дальнейших исследованиях предлагается решать обратную оптическую задачу, связанную с восстановлением профиля снимаемого материала с минимальной погрешностью при измерении различных факторов, входящих в параметр K . Среди данных факторов, может быть шероховатость оптической поверхности, измеренная экспериментально различными приборами, начиная от стадии грубого шлифования (ИК-интерферометрами и щуповыми профилометрами), заканчивая стадией глубокой полировки, когда уровень поверхностных неоднородностей достигает значения 0,4 - 0,5 нм (здесь применяются высокоточные динамические интерферометры, интерферометры белого света, ОЭП контроля статистических параметров шероховатости на основе регистрации рассеянного лазерного излучения).

Список литературы

1. Козерук А.С, Юринок В.И, Кузнецик В.О. и др. // Наука и техника. 2013. № 5. С. 27-30.

Л.А. МАКСИМОВА¹, Б.А. ПАТРУШЕВ², Н.Ю. МЫСИНА¹,
В.П. РЯБУХО^{1,2}

¹*Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов*

²*Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского*

ЛАЗЕРНЫЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТР ПОПЕРЕЧНЫХ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ РАССЕИВАЮЩЕГО ОБЪЕКТА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассматривается лазерный спекл-интерферометр латеральных микроперемещений рассеивающих объектов. Получены аналитические выражения для спекл-модулированной интерференционной картины в дальнем поле дифракции двух наклонно падающих лазерных пучков, рассеянных шероховатой поверхностью объекта. Выполнено численное моделирование спекл-модулированных интерференционных картин и натурные эксперименты при температурных смещениях поверхности рассеивающего объекта в режимах его нагрева и охлаждения.

L.A. MAKSIMOVA¹, B.A. PATRUSHEV², N.Yu. MYSINA¹,
V.P. RYABUKHO^{1,2}

¹*Institute for Problems of Precision Mechanics and Control of the RAS, Saratov*

²*National Research Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky*

LASER SPECKLE-INTERFEROMETER OF LATERAL MICRODISPLACEMENT OF SCATTERING OBJECT: COMPUTER MODELS AND NATURAL EXPERIMENT

A laser speckle interferometer of lateral micro-displacements of scattering objects is considered. Analytical expressions are obtained for a speckle-modulated interference pattern in the far-field diffraction of two obliquely incident laser beams scattered by a rough surface of object. Numerical simulation of speckle-modulated interference patterns and full-scale experiments at temperature displacements of the surface of a scattering object in the modes of its heating and cooling have been performed.

Разработана компьютерная модель формирования интерференционных картин на выходе лазерного спекл-интерферометра поперечных микросмещений объекта, освещаемого непересекающимися лазерными пучками, при использовании цифрового матричного фотоприёмника. Спекл-интерферометр экспериментально использован для измерения

динамических температурных микросмещений объекта, выполнено сравнение результатов, получаемых экспериментально и с помощью численного моделирования при тех же величинах и параметрах смещения.

В спекл-интерферометре рассеянное поверхностью объекта лазерное волновое поле приобретает спекл-модуляцию в дифракционном поле и в результате интерференции неидентичных спекл-полей формируется спекл-модулированная интерференционная картина (рис. 1).

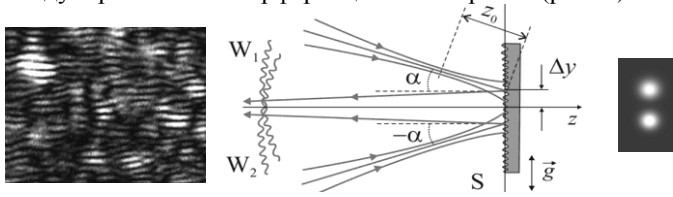


Рис. 1. Схема освещения поверхности объекта S двумя лазерными пучками и формирования дифракционной интерференционной картины на выходе спекл-интерферометра

Определение взаимного фазового сдвига $\Delta\varphi(g)$ интерферирующих дифракционных полей в результате поперечного смещения g рассеивающей поверхности позволяет определить величину смещения поверхности: $g = \Delta\varphi\lambda / (4\pi\sin\alpha)$. На рис. 2 представлены временные цифровые интерферограммы (осциллограммы) – кривые изменения интенсивности $I(t)$ в отдельных спеклах поля, возникающие в области дифракции при смещении поверхности $g(t)$. Число m полуосцилляций $I(t)$ определяется взаимным фазовым сдвигом $\Delta\varphi(t)$ дифракционных полей $m = \Delta\varphi(t)/\pi = 4gs\sin\alpha/\lambda$.

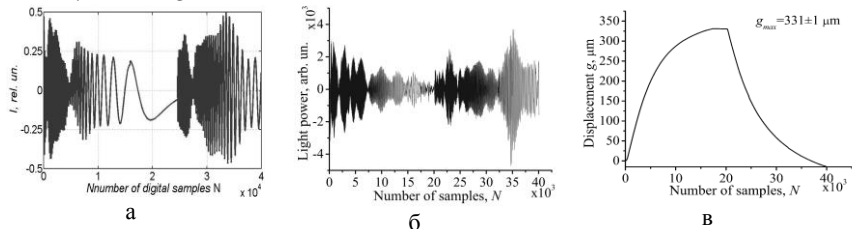


Рис. 2. Интерферограммы $I(t)$: компьютерное моделирование (а), натурный эксперимент (б); график поперечного смещения рассеивающей поверхности (в), построенный по экспериментальной нормированной интерферограмме с рис. 2б

Компьютерная модель спекл-интерферометра позволяет выявлять физические, метрологические свойства и параметры выходных измерительных сигналов спекл-интерферометров рассмотренного вида.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ДВУХЭКСПОЗИЦИОННАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Реализован способ записи голограмм пропускающих динамических периодических структур методом двух экспозиций. Представлены экспериментальные результаты опробования предложенного способа при исследовании динамики двумерных периодических структур в реальном времени.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

TWO-EXPOSURE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF DYNAMIC PERIODIC STRUCTURES

A method for recording holograms of transmissive dynamic periodic structures by the method of two exposures has been implemented. Experimental results of testing the proposed method when studying the dynamics of two-dimensional periodic structures in real time are presented.

На основе метода записи и последующего восстановления голограмм пропускающих периодических структур световыми волнами, дифрагированными на исследуемой структуре. [1, 2] предложен и реализован двухэкспозиционный способ записи голограмм динамических периодических структур, позволяющий визуализировать изменения структуры, в полосах бесконечной ширины.

Суть способа заключается в двухэкспозиционной записи голограмм в различные моменты времени и восстановлении интерференционных картин, отображающих пространственное изменение периодической структуры объекта, произошедшее за временной промежуток между двумя экспозициями голограммы.

На рис. 1 представлена оптическая схема, поясняющая запись двухэкспозиционной голограммы при реализации данного метода голографической интерферометрии. Голограмма H экспонируется парой волн, дифрагированных непосредственно на исследуемой структуре O . Плоскость голограммы оптически сопряжена с периодической структурой O объективами L_3 и L_4 .

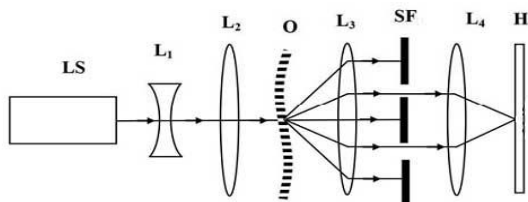


Рис. 1. Оптическая схема, поясняющая запись двухэкспозиционной голограммы: LS – лазерный источник света; L1 – рассеивающая линза; L2, L3, L4 – объективы; O – исследуемая периодическая структура; SF, H – двухэкспозиционная голограмма

Для отображения изменений периодической структуры голограмма N экспонируется дважды. Полученная таким образом двухэкспозиционная голограмма восстанавливается по известной методике [3, 4].

При опробовании метода голографической интерферометрии динамических периодических структур в качестве объекта была использована двумерная периодическая структура, представляющая собой крестообразную сетку. На рис. 2 представлена восстановленная интерференционная картина, визуализирующая динамику поведения периодической структуры при нарастающей деформации её поверхности.



Рис. 2. Восстановленная интерференционная картина с двухэкспозиционной голограммы периодической структуры

Список литературы

1. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. № 3. С. 56-60.
2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Проблемы физики, математики и техники. 2019. № 1. С. 7-12.
3. Лявшук И.А., Ляликов А.М. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 2. С. 154-158.
4. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Проблемы физики, математики и техники. 2017. № 3. С. 7-13.

Ю.Х. ИСМАНОВ¹, Т.Д. ТЫНЫШОВА

Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызская Республика

¹*Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек*

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНТЕРФЕРОГРАММ, ПОЛУЧАЕМЫХ НА ВЫХОДЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

Показано, что наличие цифровой информации об объектных и опорных волнах, о зафиксированной ПЗС-матрицей интерференционной картине позволяет производить над этими данными различные математические операции, после которых их снова можно вывести на экран, т. е. визуализировать. Предложена последовательность численных операций, позволяющая увеличить чувствительность голографической системы в два раза.

Yu.Kh. ISMANOV¹, T.D. TYNYSHOVA

Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyz Republic

¹*Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek*

IMPROVING THE CHARACTERISTICS OF INTERFEROGRAMS OBTAINED AT THE OUTPUT OF A HOLOGRAPHIC INTERFEROMETER

It is shown that the presence of digital information about the object and reference waves and about the interference pattern recorded by the CCD matrix allows performing various mathematical operations on these data, after which they can again be displayed on the screen, i.e., visualized. A sequence of numerical operations is proposed, which makes it possible to double the sensitivity of the holographic system.

Развитие информационных технологий позволяет добиваться улучшения выходных характеристик интерферометров посредством различных трансформаций записанного и оцифрованного изображения интерференционной картины.

Интерференционную картину на выходе интерферометра можно представить в виде

$$I_{\Sigma} = I_{\mu}(x, y)B_{\Sigma} \{1 + \cos[\Delta\theta(x, y)]\}, \quad (1)$$

где B_{Σ} – некоторый действительный коэффициент, описывающий полную, т. е. суммарную яркость изображения, I_{Σ} – изображение

восстановленного объекта, модулированное полосами интерференции, в случае обычной, неулучшенной чувствительности.

Проведем последовательность следующих математических операций над данными, полученными на выходе нашей интерферометрической системы:

1. Произведем операцию вычитания световых полей в выходной плоскости от исходного объекта и объекта с изменённой фазой. Полученный результат восстановим, т. е., в нашем случае это операция обратного преобразования Фурье, и, затем, представим результат в виде распределения интенсивности для разности световых полей.

Распределение интенсивности найдем в виде соотношения

$$I_1(x_0, y_0) = |\Delta v(x_0, y_0, z_0)|^2 = [\Delta v(x_0, y_0, z_0)][\Delta v(x_0, y_0, z_0)]^*, \quad (2)$$

так как в общем случае $\Delta v(x_0, y_0, z_0)$ комплексное выражение. Для выходной плоскости выражение (2) можно представить, по аналогии с выражением (1), в следующем виде

$$I_1(x, y) = I_u(x, y)B_x \{1 - \cos[\Delta\theta(x, y)]\}. \quad (3)$$

2. Вычитаем из соотношения (1) выражение (3). Полученный результат возводим во вторую степень

$$I_2 = [I_x(x, y) - I_1(x, y)]^2 = I_u^2(x, y)B_x \{1 + \cos[2\Delta\theta(x, y)]\} \quad (4)$$

Из соотношения (4) видно, что последовательность проведённых операций увеличивает сдвиг фаз между исходной и искажённой волнами в два раза, что приводит к увеличению частоты интерференционных полос в выходной плоскости также в два раза. Т. е. чувствительность голографического интерферометра увеличивается в два раза [1 - 6].

Список литературы

1. Ismanov Y., Maripov A. Holographic Talbot Interferometer // Proc. SPIE. 2000. V. 4149. P. 213-220.
2. Maripov A., Ismanov Y., Omyrzakov K. Four-channel wide-range holographic interferometer // Proc. SPIE. 2003. V. 5144. P. 606-612.
3. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography // Journal of Optics (0150-536X). 1994. V. 25. No. 1. P. 3-8.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 101-103.
5. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 2. С. 20-23.
6. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА. 2015. № 4(40). С. 194-198.

А.И. БУТЬ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ РЕВЕРСИВНОГО СДВИГА ПРИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ КОНТРОЛЕ КЛИНОВИДНЫХ ПЛАСТИН

Предложена методика повышения точности измерения клиновидности прозрачных пластин в голографической интерферометрии реверсивного сдвига. Приведены экспериментальные результаты апробации предложенной методики.

A.I. BUT, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY OF REVERSING SHIFT IN MEASURING CONTROL OF WEDGE-SHAPED PLATES

Method of increasing accuracy of measurement of wedge-shape of transparent plates in holographic interferometry of reversible shift is proposed. Experimental results of testing of proposed method are given.

Существующие интерференционные методы измерения клиновидности прозрачных пластин признаны наиболее точными и основаны на получении изображений пластины, промодулированных интерференционными полосами [1].

С целью снижения погрешности измерений угла клина ранее было предложено при формировании интерферограмм бокового сдвига сочетать разворот клиновидной пластины и поочередную настройку интерферограмм, ограниченных контуром пластины, на бесконечно широкую полосу [2]. Голографический вариант [3] данного способа позволил исключить аберрации оптической системы.

В данной работе предложен метод повышения чувствительности измерений при формировании пары безабберационных интерференционных изображений клиновидных пластин в интерферометре реверсивного сдвига. Данный метод позволяет снизить относительную погрешность измерений за счёт исключения систематической составляющей погрешности, вызванной аберрациями оптической части прибора [4], а также увеличения количества

интерференционных полос в формируемых интерферограммах клиновидной пластины.

Показано, что за счёт последовательной обработки пары интерферограмм с удвоенным количеством интерференционных полос достигается уменьшение погрешности измерений в два раза по сравнению с традиционными интерферометрическими методами.

Следует отметить, что в качестве оптической схемы установки для записи голограмм пластин может быть успешно использован любой классический двухлучевой или лазерный интерферометр с узким опорным пучком.

На рис. 1 представлены интерференционные картины клиновидной пластины, восстановленные по предложенной методике.

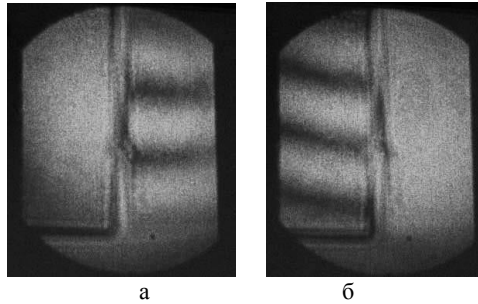


Рис. 1. Интерференционные картины клиновидной пластины при поочередной настройке левой (а) и правой (б) интерферограмм на полосы бесконечной

Для извлечения информации о величине угла клина может быть использован достаточно широкий спектр известных алгоритмов цифровой обработки интерферограмм ширины.

Список литературы

1. Креопалова Г.В. Оптические измерения .М.: Машиностроение. 1986.
2. Ляликов А.М. // Письма в ЖТФ. Т. 36. № 20. С. 87-94.
3. Буть А.И., Ляликов А.М. // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 109. № 4.С. 696-701.
4. Буть А.И., Ляликов А.М. // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 10.С. 934-938.
5. Лявшук И.А., Ляликов А.М. // Квантовая электроника. 2006. Т. 36 .№ 2. С. 154-158.

М.А. КОСТЕНИКОВ, В.А. ЛЕВАНИСОВ, В.В. КОЧЕТОВА,
С.С. ШМАКОВ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ В ОПТИКЕ

В сообщении представлена программная реализация нейронной сети, основанной на алгоритме Левенберга-Марквардта, используемая для аппроксимации сигнала фазовой демодуляции адаптивного голографического интерферометра на основе отражательных голограмм в кристаллах класса силленитов по нелинейному методу наименьших квадратов (МНК).

M.A. KOSTENIKOV, V.A. LEVANISOV, V.V. KOCHETOVA,
S.S. SHMAKOV

Tomsk State University of Control System and Radioelectronics

SOFTWARE OF A NEURAL NETWORK FOR THE APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL DATA IN OPTICS

The present a software of a neural network based on the Levenberg-Marquardt algorithm used to approximate the phase demodulation signal of an adaptive holographic interferometer based on reflection holograms in crystals of the sillenite class using the nonlinear method of least squares.

Исследования фоторефрактивных сред вызвано необходимостью развития физических основ для создания устройств динамической голографии. Одним из более чувствительных и перспективных методов подобных исследований является адаптивная голографическая интерферометрия [1].

Исследование сигнала фазовой демодуляции голографического интерферометра [1] позволяет выявлять вклады эффектов [2] в отклик, определять их количественные характеристики, что требует построения соответствующих математических моделей [2]. Сигнал фазовой демодуляции можно аппроксимировать рядом по 10 первым гармоникам:

$$U(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{10} U_n \sin\left(\frac{2\pi n}{T}t + \varphi_n\right). \quad (1)$$

Относительные амплитуды нулевой, первой и второй гармоник, которого, например, для кристаллов класса силленитов среза (100) [2], помимо линейного электрооптического эффекта будут также зависеть и от вклада обратного флексоэлектрического эффекта.

Запись выходного сигнала адаптивного голографического интерферометра при помощи цифрового осциллографа заключается в сохранении большого числа экспериментальных точек (минимум 2500 значений) на ЭВМ с последующей их аппроксимацией. Большой объём полученной информации неизбежно сопровождается проблемой нехватки ресурсов на их обработку. Аппроксимация выходного сигнала интерферометра проводилась по методу наименьших квадратов (МНК).

Как известно [3] МНК широко известно используется в регрессионном анализе, как метод построения моделей на основе зашумлённых экспериментальных данных. При этом помимо собственно построения модели обычно осуществляется и оценка погрешности, с которой были вычислены её параметры, также решается и ряд других задач.

Целью работы являлось создание программы для аппроксимации большого числа экспериментальных данных выходного сигнала адаптивного голографического интерферометра без привлечения оператора и извлечения из этой информации значений первой и второй гармоник сигнала, позволяющих оценить дополнительные вклады в фоторефрактивный отклик [2]. Программа создана на основе алгоритма Левенберга-Марквардта, так как известно, что данный алгоритм быстрее всего сходится, если все точки лежат близко от кривой (эталонной функции).

Сама же нелинейная аппроксимация процесс итеративный, скорость сходимости которого зависит от конкретно поставленной задачи, а решение нелинейной задачи характеризуется можно охарактеризовать многошаговостью: создание объекта оптимизатора (эталонная функция); настраивание оптимизатора, путем задания условий остановки; процесс решения и получение результата в виде вектор-матрицы со значениями гармоник ряда (1).

Список литературы

1. Колегов А.А., Шандаров С.М., Симонова Г.В. и др. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 9. С. 847-852.
2. Шандаров С.М., Шмаков С.С., Буримов Н.И. и др. Обнаружение вклада обратного флексоэлектрического эффекта в фоторефрактивный отклик в монокристалле титаната висмута // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. № 12. С. 699-702.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978.

Д.Г. ДЕНИСОВ, Д.Д. БАРМА, К.М. МАЛАХОВ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

СОВРЕМЕННЫЕ РЕШЕНИЯ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ В ЗАДАЧАХ АТТЕСТАЦИИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В рамках данной работы была предложена автоматизированная методика локального контроля свойств поверхности изготавливаемых деталей, основанная на атомно-силовой микроскопии. Был проведён анализ существующих аналогов на мировом рынке зондовой микроскопии, разработана математическая модель системы регистрации атомно-силового микроскопа. Также был изучен метод обработки изображения исследуемых поверхностей на примере изделий с оптическими покрытиями.

D.G. DENISOV, D.D. BARMA, K.M. MALAKHOV

Bauman Moscow State Technical University

MODERN SOLUTIONS OF ATOMIC-FORCE MICROSCOPY APPLICABLE TO CERTIFICATION OF INNOVATIVE PRODUCTS

In terms of this project automatic control technique of local sample properties based on atomic-force microscopy has been offered. Furthermore, we have performed analysis of current analogs on the world market of probe microscopy and developed mathematical model of atomic-force microscope registration system. Moreover, image processing approach has been studied in experiment with optical coatings.

Атомно-силовой микроскоп основан на силовом взаимодействии, происходящем между кантилевером и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики. Датчик представляет собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

В рамках данной работы была разработана математическая модель работы атомно-силового микроскопа. Модель (рис. 1) включает в себя сканер, интегральный контроллер, систему зонд-фотодиод и усилитель с соответствующими передаточными функциями $C(s)$, $G_s(s)$, $G_p(s)$, $G_{фд}(s)$ и $G_{УС}(s)$ и выходное звено частотного анализа топографии поверхности

образца при помощи построения функции спектральной плотности мощности (СПМ). Также модель содержит сигналы, которые генерируются соответствующими блоками, как ответ на входной сигнал: сигнал ошибки $\varepsilon(s)$, управляющее напряжение на сканере $U(s)$, положение сканера с образцом $Z(s)$, амплитуда раскачки зонда в нанометрах $A(s)$, амплитуда сигнала фотодетектора $DFL(s)$ и $Mag(s)$ – амплитуда сигнала после усиления, которая сравнивается с сигналом Mag_{sp} . Форма рельефа $h(s)$ и шум по высоте $n(s)$ действуют как возмущение на зонд и обрабатываются сканером.

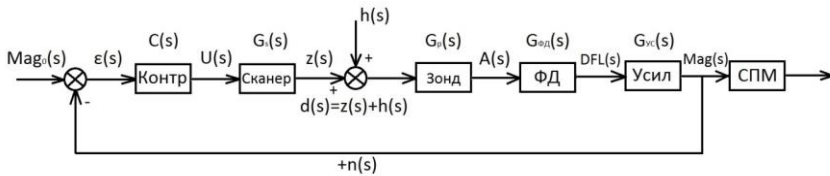


Рис. 1. Математическая модель работы атомно-силового микроскопа

В ходе эксперимента при помощи эталонного интерферометра, а затем более локально при помощи атомно-силового микроскопа NTegraEx производства компании NT-MDT Spectrum Instruments была исследована граница оптического покрытия образца, а также получена её 3D модель. Была получена СПМ вдоль горизонтального направления образца и обнаружено, что объектам определённых размеров соответствуют характерные частоты данной функции. Основываясь на частотном анализе образца, предлагается создать автоматизированную систему контроля свойств поверхности производимых на предприятиях изделий при помощи атомно-силового микроскопа.

Список литературы

1. Миронов В. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004.
2. Wilson R.A., Bullen H.A. Introduction to scanning probe microscopy (SPM) basic theory atomic force microscopy (AFM). Northern Kentucky University, Highland Heights, KY 41099.
3. Binning, Quate, Gerber // Phys. Rev. 1986. V. 56. P. 930-933.
4. Bhushan B. Handbook of Nanotechnology. Boston, MA: Springer US, 2004.

И.В. БОГАЧКОВ, А.В. ХОМЧЕНКО, Н.А. ЧУРСИН
 Омский государственный технический университет

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИФРАКЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ЗОН ФРЕНЕЛЯ

В работе описана виртуальная лабораторная работа для изучения дифракции света с помощью зон Френеля, разработанная в ОмГТУ.

I.V. BOGACHKOV, A.V. HOMCHENKO, N.A. CHURSIN
 Omsk State Technical University

DEVELOPMENT OF THE VIRTUAL LABORATORY CLASS FOR STUDYING LIGHT DIFFRACTION USING FRESNEL ZONES

The virtual laboratory work for studying the light diffraction on the basis of Fresnel zones developed in Omsk State Technical University is presented.

Для проведения лабораторных занятий в дистанционной форме представляет интерес разработка виртуальных лабораторных работ. Это стало актуальным с 2017 г. (заочная и очно-заочная формы обучения студентов), но с марта 2020 г. оказалось необходимым и для очной формы обучения радиотехнических и связанных направлений подготовки [1].

На рис. 1 показан рабочий экран программы [2].

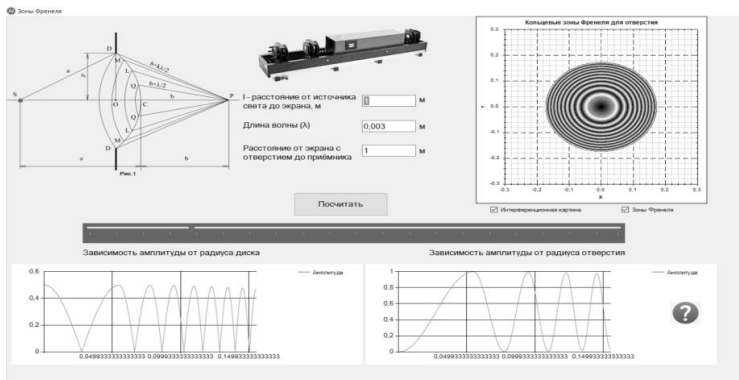


Рис. 1. Рабочий экран программы

С помощью описанной программы можно исследовать дифракцию света на основе анализа зон Френеля (на круглом отверстии или на круглом диске) [1, 2].

Пользователю необходимо задать значения расстояния от источника света до экрана, длины волны и расстояния от препятствия до приёмника.

В результате для заданных значений параметров можно построить интерференционные картины и изучить влияние зон Френеля.

На основе графика «Кольцевые зоны Френеля ...» можно проанализировать полученную интерференционную картину.

Передвижением ползунка на панели можно изменить масштаб графиков зависимостей (рис. 2) [2].

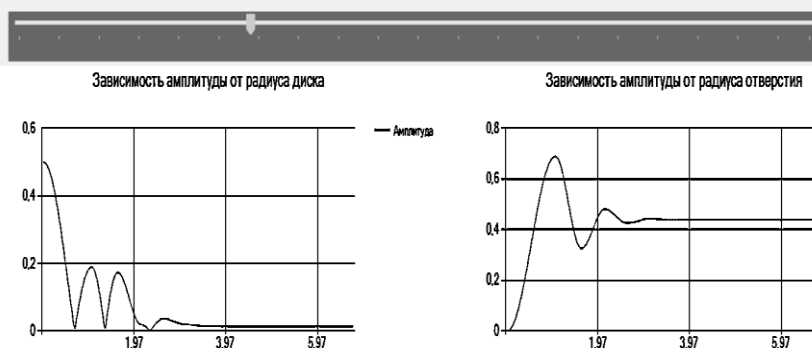


Рис. 2. Зависимости амплитуды от радиуса диска и радиуса отверстия

С помощью графиков можно проанализировать зависимость амплитуды от радиуса диска и зависимость амплитуды от радиуса отверстия. Оценить влияние препятствий в целом.

Кнопка «Помощь» поможет узнать информацию о данном программном обеспечении, а также перейти к методическим указаниям в случае затруднений.

Список литературы

1. Богачков И.В. Электромагнитные поля и волны: учеб. пособие: в 2 ч. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2014.
2. Богачков И.В., Хомченко А.В., Н.А. Чурсин Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24587. Изучение распространения волн с помощью зон Френеля // М.: ОФЭРНиО, опубли. 09.09.2020.

Д.Д. БАРМА, Д.Г. ДЕНИСОВ, А.Р. ГЕЙВАНДОВ¹

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

¹*Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова*

ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва

РАЗРАБОТКА ФАЗОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЁТОК НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Были разработаны дифракционные решётки (ДР) на основе жидких кристаллов (ЖК) для получения электрически-управляемой дифракции. При помощи специализированного программного обеспечения мы рассчитали дифракционную эффективность фазовой решётки на основе ЖК в зависимости от приложенного напряжения. В ходе работы были изучены методы изготовления ДР на основе ЖК и методы создания жидкокристаллических ячеек.

D.D. BARMA, D.G. DENISOV, A.R. GEIVANDOV¹

Bauman Moscow State Technical University

¹*Shubnikov Institute of Crystallography of FSRC «Crystallography and Photonics»*

of the RAS, Moscow

DEVELOPMENT OF GEOMETRIC-PHASE GRATINGS BASED ON LIQUID CRYSTALS

We have developed geometric-phase gratings (GPG) based on liquid crystals for the purpose to obtain high diffraction efficiency. Using custom-made computer software we have calculated the GPG diffraction efficiency vs applied voltage. Furthermore, fabrication techniques for the GPG gratings and liquid crystal cells have been studied.

Классическая дифракционная решётка (ДР) – это оптический прибор, действие которого основано на явлении отклонения от прямолинейности распространения света при его преломлении или отражении на регулярных неоднородностях (например, щелях или рельефе). ДР находят своё применение в спектрометрах оптического и инфракрасного диапазонов [1], а также в качестве оптических датчиков линейных и угловых перемещений.

В случае ДР на основе жидких кристаллов происходит взаимодействие фазы поляризованного света с регулярно модулированным показателем преломления. Поэтому ДР на основе жидких кристаллов (ЖК) является фазовой ДР [2]. ДР на основе ЖК можно переключать электрическим полем. Такие решётки используются в дисплеях, устройствах

дополненной реальности, а также поляризационных светоделительных устройствах.

Для изготовления ДР на основе ЖК на подложку с прозрачным электродом наносят анизотропный краситель, затем записывают голограмму с заданным периодом [4] и собирают ЖК-ячейку (толщиной около 4 мкм) из подложки с голограммой и второй подложки с электродом, между которыми капиллярным методом инжестируют ЖК. В такой ячейке голограмма создает периодическую ориентацию директора ЖК (рис. 1а).

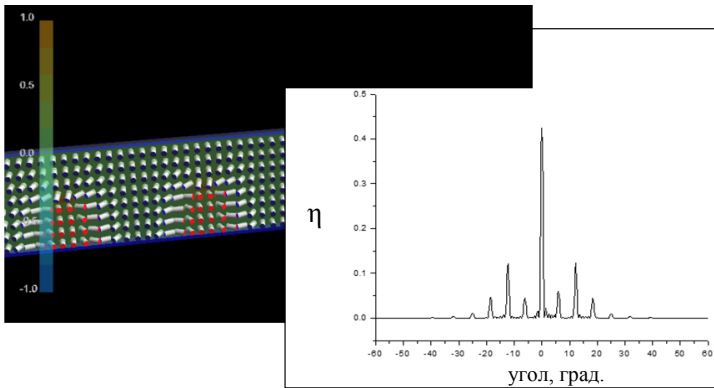


Рис. 1. Распределение директора ЖК (а) и угловая зависимость дифракционной эффективности ЖК-ячейки (б)

С помощью программного обеспечения LCDTDK было рассчитано распределение директора ЖК в зависимости от напряжения. Далее была решена оптическая задача и рассчитана дифракция в дальней зоне (рис. 1б).

Была измерена угловая зависимость дифракции на установке с лазерным источником света (длина волны 532 нм) без напряжения и при приложении напряжения. При приложении к ЖК-ячейке напряжения 10 В дифракция первого порядка подавляется в 5 раз. Данные моделирования и эксперимента хорошо согласуются между собой.

Список литературы

1. Знаменский М.Ю. и др. // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 3. С. 51-54.
2. Anandan J. // Nature. 1992. V. 360. P. 307.
3. Блинов Л.М. Жидкие кристаллы: Структура и свойства. М.: Либроком, 2013.
4. Crawford P., Eakin J.N., et al. // J of Applied Physics. 2005. V. 98. P. 123102.

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

**НОВЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЁТОК
НА БИХРОМИРОВАННОМ ЖЕЛАТИНЕ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОРОТКОВОЛНОВОГО
УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Обсуждаются два новых метода обработки слоёв бихромированного желатина (БХЖ) при изготовлении высокочастотных голографических решёток с пространственной частотой не менее 1500 мм^{-1} при облучении первоначально зарегистрированных с помощью He-Cd лазера голографических структур коротковолновым УФ-излучением с длиной волны менее 250 - 270 нм.

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

**NEW METHODS OF HIGH-FREQUENCY HOLOGRAPHIC
GRATINGS FORMATION ON DICHROMATED GELATIN
WHEN USING SHORT-WAVE UV-RADIATION**

Two new methods of dichromated gelatin (DCG) layers processing in the manufacture of high-frequency holographic gratings with a spatial frequency of at least 1500 mm^{-1} are discussed when the holographic structures initially registered with a He-Cd laser are irradiated with short-wave UV-radiation with a wavelength of less than 250 - 270 nm.

Использование слоёв БХЖ в качестве светочувствительной среды при изготовлении высокочастотных рельефно-фазовых голографических дифракционных решёток (ГДР) требует создание новых методов обработки, отличающихся от стандартной методики [1], при использовании которой поверхностный рельеф решётки образуется за счёт вымывания разрушенных коротковолновым ультрафиолетом участков желатина водой. Наличие водной обработки препятствует образованию поверхностного рельефа на пространственных частотах, превышающих $200 - 300 \text{ мм}^{-1}$. Спад высоты поверхностного рельефа и связанной с ним дифракционной эффективности (ДЭ) объясняется

сглаживающим воздействием возникающих во влажном желатиновом слое сил поверхностного натяжения (СПН). Для снижения влияния СПН нами было предложено два варианта изменения стандартной процедуры обработки слоёв БХЖ.

В первом случае осуществлялось сокращение времени водной обработки до минимума (кратковременное купание в воде в течение 10 с) и введение процедуры быстрого обезвоживания с помощью изопропанола [2]. В этом случае в слое желатина возможно одновременное существование поверхностной (рельефной) и объёмной (за счёт модуляции показателя преломления) пространственно-периодических структур. Ряд различных экспериментов позволил определить вклад поверхностного рельефа в ДЭ. Так нанесение иммерсионной жидкости на поверхность ГДР для большинства образцов приводило к сглаживанию рельефа и существенному падению ДЭ. В то же время без иммерсионной жидкости ДЭ достигала в максимуме 55 %. Зависимости ДЭ образцов от угла брэгговского рассогласования $\delta\theta$ считывающего луча He-Ne лазера показали, что толщина слоя БХЖ мало влияет на ширину экспериментальной угловой зависимости ДЭ, что характерно для тонкой рельефной структуры. Прямым измерением поверхностной структуры решёток методом атомно-силовой микроскопии также был подтверждён рельефно-фазовый характер ГДР.

Второй вариант обработки высокочастотных рельефно-фазовых ГДР заключался в полном отказе от водных процедур и замене их термообработкой во время облучения коротковолновым УФ-излучением [3]. Использовались слои БХЖ разной толщины от 2,5 мкм до 15 мкм. Термическая обработка образцов продолжалась примерно 90 минут при температуре около 160 °С. Удаление разрушенного УФ-излучением желатина при этом происходило преимущественно из наименее задубленных He-Cd лазером при записи решёток участков первичной голографической структуры за счёт испарения и усадки. В экспериментах получено увеличение ДЭ решёток в 2 - 3 раза.

Результаты применения двух новых методик обработки слоёв БХЖ позволяют надеяться на то, что голографические решётки на дешёвом и простом в изготовлении слое БХЖ будут востребованы на практике.

Список литературы

1. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42 (19). С. 26.
2. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В. // Автотметрия. 2020. Т. 56 (2). С. 92.
3. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128 (10). С. 1507.

Е.Ф. ПЕН

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

ЭФФЕКТИВНАЯ ЭНЕРГИЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ С УЧЁТОМ ТЕМНОВОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Проведено сравнение энергии голографической записи в фотополимерных материалах в режимах непрерывной и прерывистой засветки. Установлено, что за счёт темновой полимеризации прерывистый режим может дать экономию в энергии записи в 2-3 раза, однако в этом случае общее время записи пропорционально увеличивается.

E.F. PEN

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk

EFFECTIVE ENERGY OF HOLOGRAPHIC RECORDING TAKING INTO ACCOUNT DARK POLYMERIZATION

A comparison of the energy of holographic recording in photopolymer materials in the modes of continuous and discontinuous illumination is carried out. It has been established that due to dark polymerization, the discontinuous mode can save 2 – 3 times in recording energy, but in this case the total recording time increases proportionally.

Одной из основных характеристик голографических фотополимерных материалов (ГФПМ) является их светочувствительность, определяемая как энергия засветки, необходимая для достижения максимально возможной дифракционной эффективности (ДЭ) голограмм. Световая энергия тратится на возбуждение и поддержание фотохимических процессов в ГФПМ, в результате которых мономер превращается в фотополимер. Эти процессы исследованы многими авторами [1, 2], которые в ходе экспериментов обнаружили эффект темновой полимеризации, когда рост полимерной цепи продолжается и после прекращения засветки. В [2] отмечено, что этот факт может быть использован с целью экономии световой энергии для достижения конечной ДЭ. Предложено также применять режим прерывистой записи, при котором интервалы засветки t_c и её отсутствия t_m чередуются. Однако, подробных ни теоретических, ни экспериментальных исследований такого режима не проведено, в частности, не сделаны количественные оценки степени экономии световой энергии.

Цель работы – детальное исследование режимов прерывистой засветки, обеспечивающих наибольшую экономию энергии засветки. Степень этой экономии зависит от многих факторов: свойств ГФПМ, связанных с диффузией мономера и его конверсией в полимер; интенсивности и параметров прерывистой засветки.

Получены новые экспериментальные и расчётные данные о динамике ДЭ в режимах непрерывной и прерывистой засветки. Расчёты моделировали различные условия записи и проводились по формулам:

$$\Delta n = \sum_{n=1}^N \Delta n^{(n)} \quad \Delta n^{(n)} = \Delta n^{(n)}(t_e) + \Delta n^{(n)}(t_m) \quad \Delta n^{(n)}(t_m) = c M_1^{(n)}(t_e) [1 - \exp(-t_m / d \tau_D)]$$

$$\Delta n^{(n)}(t_e) = \frac{\tau_p \Delta n_{sat}^{(n)}}{\tau_p + \tau_D} \left[1 - \exp(1 - \exp(t_e / \tau_p)) - \frac{\tau_D}{\tau_p + \tau_D} (1 - \exp(-\frac{(\tau_p + \tau_D)t_e}{\tau_p \tau_D})) \right]$$

$$M_1^{(n)}(t_e) = \frac{m \delta \tau_D}{\tau_p + \tau_D} M_0 \left[\exp(1 - \exp(t_e / \tau_p)) * (\exp(t_e / \tau_p) - \exp(-t_e / \tau_D)) \right]^n$$

На рис. 1 представлены результаты экспериментов в режимах непрерывной и прерывистой засветки.

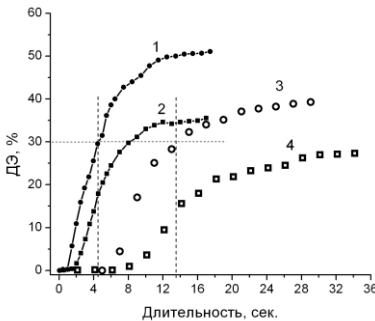


Рис. 1. Сравнение результатов экспериментов в режимах непрерывной и прерывистой засветки: кривые 1 и 2 – непрерывная засветка с интенсивностями 20 и 10 мВт/см²; 3 и 4 – прерывистая запись с этими же значениями интенсивности и $t_e = 0.2$ с, $t_m = 1.8$ с, количество циклов прерывистой записи $N = 30$

Установлено, что за счёт темновой полимеризации прерывистый режим может дать экономию в энергии записи в 2 – 3 раза, однако в этом случае общее время записи пропорционально увеличивается.

Список литературы

1. Gleeson M.R., Sheridan J.T. // J. Opt. A: Pure and Appl. Opt. 2009. V. 11. P. 1-12.
2. Piazzolla S., Jenkins B.K. // J. Opt. Soc. Am. 2000. V. 17. No. 7. P. 1147-1157.

Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, Ю.Х. ИСМАНОВ, К.М. ЖУМАЛИЕВ
Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ОСОБЕННОСТИ СКОРОСТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАТЕНТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ЗАПИСАННЫХ НА ТОНКИХ ФОТОТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ

Проведён теоретический анализ особенностей проявления скрытого изображения голограммы на фототермопластических носителях при высокой скорости нагрева. Выявлены закономерности динамики развития геометрического рельефа поверхности в зависимости от скорости нагрева. Показана возможность управления информационными свойствами среды путем выбора времени отсечки источника нагрева и регулирования мощности источника.

N.K. DZHAMANKYZOV, Yu.Kh. ISMANOV, K.M. ZHUMALIEV
Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

FEATURES OF HIGH-SPEED RECOVERY OF LATENT IMAGES RECORDED ON THIN PHOTOTHERMOPLASTIC FILMS

A theoretical analysis of the features of the latent image of a hologram on photothermoelastic carriers at a high heating rate is carried out. The regularities of the dynamics of the development of the geometric surface relief depending on the heating rate are revealed. It is shown that it is possible to control the information properties of the environment by choosing the cutoff time of the heating source and controlling the power of the source.

В данной работе был рассмотрен лазерный нагрев фототермопластического носителя, который состоит из твёрдой диэлектрической подложки, покрытой тонким (толщиной $h_2 \approx 0,5 - 1$ мкм) металлическим слоем (например, SnO_2 , InO_2). В свою очередь, металл покрыт слоем фототермопластического материала толщиной $h_1 \approx 1 - 2$ мкм.

Процесс нагрева описывается системой дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i(z, t)}{\partial t} - a_i \frac{\partial^2 T_i(z, t)}{\partial z^2} = \frac{q_i(z, t)}{c_i} \rho_i, \quad T_i(z, 0) = 0 \quad \text{-- начальные условия,} \quad (1)$$

Здесь ρ_i – плотность, c_i – теплоёмкость, k_i – теплопроводность, a_i – коэффициент температуропроводности материалов структуры; $q_i(z, t)$ – распределение источников тепла в материале по оси z , индексы 1, 2, 3 относятся к параметрам фототермопластической плёнки, проводящего слоя и подложки соответственно.

$$T_3(\infty, t) = 0, T_1(h_1, t) = T_2(h_1, t), k_1 \frac{\partial T_1(h_1, t)}{\partial z} = k_2 \frac{\partial T_2(h_1, t)}{\partial z}, \quad (2)$$

$$T_2(h_2, t) = T_3(h_2, t), k_2 \frac{\partial T_2(h_2, t)}{\partial z} = k_3 \frac{\partial T_3(h_2, t)}{\partial z}.$$

Решая (1), находим пороговую длительность импульса излучения, с которой начинается формирование температурного градиента

$$t_p = \frac{\pi}{4a_3} \left(\frac{\rho_1 c_1 h_1 + \rho_2 c_2 h_2}{\rho_3 c_3} \right)^2. \quad (3)$$

Также находим температур размягчения поверхности фототермопластической плёнки

$$T_p = \frac{d\theta}{dt} t + \frac{dT_1}{dz} h_1. \quad (4)$$

Анализ полученных решений показал, что, при высокоскоростном нагреве покрытия фототермопластической подложки возникает дополнительная возможность оптимизации процесса записи за счёт выбора времени отсечки источника нагрева и регулирования мощности нагревающего источника [1 - 5].

Список литературы

1. Dzhamankyzov N.K., Ismanov Y.Kh. Temperature modes of development of holograms recorded on photothermoplastic media heated by laser // Optical Engineering. 2018. V. 57. No. 6. P. 067103.
2. Джаманкызов Н.К., Исманов Ю.Х. Температурный режим проявления скрытого изображения голографической записи на фототермопластических носителях // VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2019. С. 275-276.
3. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА. 2015. № 4(40). С. 194-198.
4. Исманов Ю.Х. Голографический эффект Тальбота в интерферометрии // Вестник КРСУ. 2015. № 5(15). С. 101-103.
5. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 2. С. 20-23.

Н.Т. АВЛАСЕВИЧ, А.М. ЛЯЛИКОВ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Беларусь

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГОЛОГРАММ
ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР
ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНОМ ОСВЕЩЕНИИ**

Рассмотрены особенности формирования голограмм исследуемой периодической динамической структуры. Предложены две схемы записи голограмм без опорного пучка и с опорным пучком. Выявлены возможности регулирования частоты полос голографической структуры.

N.T. AVLASEVICH, A.M. LYALIKOV

Y. Kupala Grodno State University, Belarus

**FEATURES OF THE FORMATION OF HOLOGRAMS
OF PERIODIC STRUCTURES UNDER SPATIAL
COHERENT ILLUMINATION**

The features of the formation of holograms of the studied periodic dynamic structure are considered. Two schemes for recording holograms without a reference beam and with a reference beam are proposed. The possibilities of regulating the frequency of the bands of the holographic structure are revealed.

При формировании голограмм пропускающих периодических структур парой световых когерентных пучков, возможны два варианта записи голограмм [1-3]. На первом рис. 1а представлена оптическая схема записи голограммы, в которой два пучка света одновременно проходят периодическую структуру, а на втором (рис. 1б) – только один пучок проходит периодическую структуру, при этом второй пучок выполняет функцию опорной волны и с периодической структурой не взаимодействует. На экране SF (рис. 1а) формируется две дифракционные картины, что при изменении направления распространения световых волн дифракционные картины будут смещаться в частотной плоскости, что позволяет после выделения световых волн, дифрагированных на периодической структуре, произвольно регулировать их направление распространения. Данная особенность позволяет при записи голограмм задавать требуемую пространственную частоту полос голографической структуры.

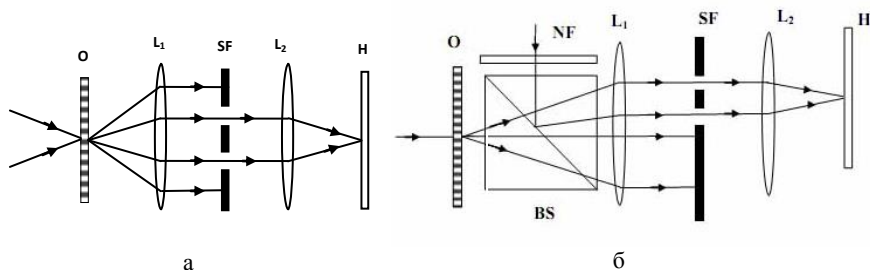


Рис. 1. Оптическая схема записи голограмм двумя когерентными пучками света: два пучка проходят периодическую структуру (а); один пучок проходит периодическую структуру, второй является опорным (б):
 О – исследуемая периодическая структура, L_1 , L_2 – объективы, SF – экран,
 NF – нейтральный светофильтр, BS – светоделитель, Н – голограмма

Схема записи голограмм на рис. 1б отличается тем, что вторая световая волна, пройдя светофильтр NF посредством светоделителя направляется в отверстие экрана SF и выполняет роль опорной волны при формировании голограммы Н. Нейтральный светофильтр NF в этой схеме предназначен для выравнивания интенсивностей опорной волны и волны, дифрагированной на периодической структуре О в n -й порядок. Частота полос голографической структуры также регулируется. Единственный недостаток такой схемы записи голограмм – это меньшее усиление фазы, чем в при записи по схеме, приведённой на рис. 1а. Регулирование частоты, а именно уменьшение частоты полос голографической структуры голограммы, позволит не зависимо от исходной пространственной частоты периодической структуры согласовать частоту полос голограммы с предельным пространственным разрешением матрицы ПЗС камеры. В этом случае полностью снимается требование к разрешению матрицы ПЗС камеры при реализации метода цифровой голографической интерферометрии.

Список литературы

1. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Оптический журнал. 2019. № 3. С. 56-60.
2. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Вестник ГрГУ им. Янки Купалы. Сер. 2. 2020. № 1. С. 75-82.
3. Ляликов А.М., Авласевич Н.Т. // Проблемы физики, математики и техники. 2017. № 3. С. 7-13.

Г.И. ГАРНАЕВА, Л.А. НЕФЕДЬЕВ, Э.И. НИЗАМОВА
Казанский (Приволжский) федеральный университет

**ЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ В ОПТИЧЕСКОЙ
ЭХО-ГОЛОГРАФИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИМИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕОДНОРОДНЫМИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ**

Рассмотрена реализация логических операций для изображений, с использованием аккумулированной эхо-голограммы при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей. Показано, что эффект запираания фотонного эха позволяет осуществлять управление видом логических операций путем варьирования величинами градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей – от объединения множеств, до симметрической разности и их суперпозиции.

G.I. GARNAEVA, L.A. NEFEDIEV, E.I. NIZAMOVA
Kazan Federal University

**LOGICAL OPERATIONS IN AN OPTICAL ECHO
HOLOGRAPHY UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL
SPATIAL INHOMOGENEOUS ELECTRIC FIELDS**

The implementation of logical operations for images using an accumulated echo hologram in the presence of external spatially inhomogeneous electric fields is considered. It is shown that the photon echo locking effect allows controlling the type of logical operations by varying the values of the gradients of external spatially inhomogeneous electric fields – from the Union of sets, to the symmetric difference and their superposition.

В данной работе исследована эффективность подавления отклика стимулированного фотонного эха (СФЭ) при различных схемах воздействия на резонансную среду пространственно-неоднородных электрических полей.

На рис. 1 приведена последовательность возбуждающих импульсов, использующаяся при реализации логических операций симметрическая разность, объединения множеств и логических операций, являющихся их суперпозицией при наличии внешних пространственно-неоднородных электрических полей.

Так как отклик АДЭГ является суперпозицией откликов ДЭГ (долгоживущих эхо-голограмм) от N пар импульсов со считывающим импульсом, то вклад в него от каждой пары возбуждающих импульсов становится разным (зависящим от величины градиентов внешних пространственно-неоднородных электрических полей и их взаимной ориентации), что даёт возможность управления логическими операциями с использованием АДЭГ.

Такое возбуждение АДЭГ можно осуществить в кристалле $\text{LaF}_3:\text{Pr}^{3+}$ где временной интервал между импульсами в парах может составлять десятки наносекунд, а временной интервал между парами и временной интервал между последней записывающей парой и считывающим импульсом могут достигать десятков минут при гелиевых температурах кристалла.

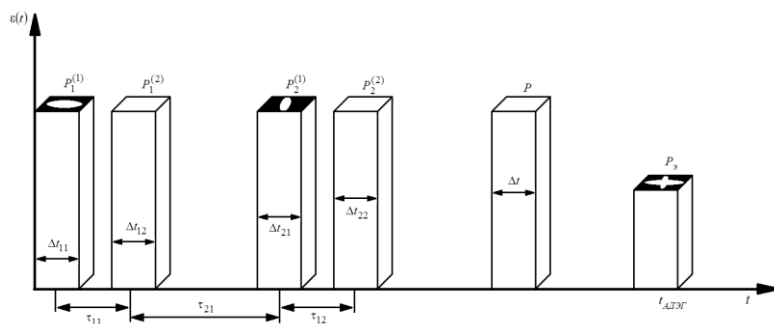


Рис. 1. Последовательность возбуждающих импульсов и импульсов пространственно-неоднородных электрических полей при формировании откликов АДЭГ. $\Delta t_{11} = \Delta t_{21} = \Delta t$, $\tau_{11} = \tau_{12} = \tau_1$, $\tau_2 \approx \tau_{21} + \tau_{22} + 2\tau_1$.

Полученные отклики в режиме АДЭГ содержат изображения, являющиеся результатом логических операций объединения множеств при нулевых градиентах внешних пространственно-неоднородных электрических полей и симметрической разности при достаточной величине градиента после считывающего импульса. При других значениях величин градиентов наблюдается суперпозиция этих логических операций.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МАТРИЧНЫЙ КОНТЕЙНЕР ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Разработан универсальный матричный контейнер цифровых данных для использования в системах оптической обработки информации. По результатам численных и оптических экспериментов определены оптимальные параметры разработанного контейнера при его использовании в системе оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

VERSATILE MATRIX CONTAINER OF DIGITAL DATA FOR USE IN OPTICAL DATA PROCESSING SYSTEMS

We are proposing new versatile matrix container of digital data for optical data processing systems. Optimal parameters of the developed container for usage in the optical encryption system with spatially incoherent illumination are determined in numerical and optical experiments.

В системах оптической обработки данных для представления цифровой информации в графическом виде зачастую используются QR-коды. Их главное преимущество – устойчивость к искажениям, обусловленная использованием кодов с коррекцией ошибок, обеспечивающих безошибочное извлечение информации, даже если часть самого QR-кода повреждена. Однако изначально QR-коды разрабатывались для промышленности, поэтому их стандарты не являются оптимальными для систем оптической обработки информации.

Разработанный универсальный матричный контейнер основан на схожих принципах и представляет собой бинарное либо многоградационное изображение с контуром произвольной формы, информация в котором упакована с использованием кодов из класса БЧХ (Боуза-Чоудхури-Хоквингема). По сравнению с QR-кодом он обладает большей гибкостью в выборе параметров и может быть специализирован под нужды конкретной оптической системы. Пример разработанного контейнера и его фрагмент представлены на рис. 1.

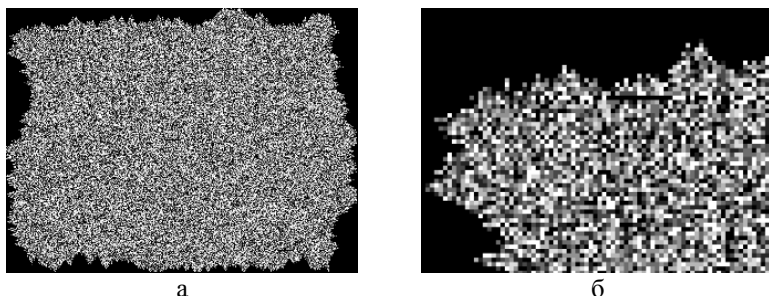


Рис. 1. Пример многоградационного матричного контейнера цифровых данных (а) и его увеличенный фрагмент (б)

Представленный контейнер имеет размер 320 x 240 отсчётов (включая контур шириной 10 %), степень избыточности (процент корректируемых ошибок) 10 % и содержит текстовый файл длиной 6 кб (формат txt).

Разработанный контейнер обладает следующими параметрами: гибкий выбор размеров (от 64 отсчётов по одной стороне, без ограничения сверху); гибкий выбор номинальной степени избыточности в диапазоне от 1 до 25 %; возможность перемешивания выходных бит информации по полю контейнера для ослабления влияния областей локализации ошибок; произвольное количество градаций яркости; возможность добавления контура произвольной формы.

Проведённые эксперименты по использованию контейнера в системе оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением позволили найти его оптимальные параметры и определить соотношение между номинальной и реальной значениями коррекции ошибок. Данное соотношение составило 52,5 % для контейнера, для QR-кодов – 15,7 %. Более высокое значение в контейнере достигается за счёт перемешивания выходных бит информации и отсутствия опорных точек (поисковых и выравнивающих узоров, полос синхронизации), искажение которых в QR-кодах приводит к тому, что информация не может быть извлечена ещё до достижения номинальной степени избыточности.

Таким образом, разработанный универсальный матричный контейнер является предпочтительной альтернативой использованию QR-кодов в системах оптической обработки информации, поскольку может быть специализирован под требования конкретной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

Н.Н. ЕВТИХИЕВ, В.В. КРАСНОВ, И.П. РЯБЦЕВ, А.В. ШИФРИНА
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ОПТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ НОВЫХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ МАТРИЧНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ В БЕЗЛИНЗОВОЙ СХЕМЕ С ПРОСТРАНСТВЕННО- НЕКОГЕРЕНТНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Проведены эксперименты по оптическому кодированию и численному декодированию новых универсальных матричных контейнеров цифровых данных в безлинзовой схеме оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Число ошибок в декодированных изображениях не превышало 0,8 %. Информация из декодированных изображений безошибочно считана благодаря встроенному коду с коррекцией ошибок.

N.N. EVTIKHIEV, V.V. KRASNOV, I.P. RYABCEV, A.V. SHIFRINA
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

OPTICAL ENCRYPTION OF NEW VERSATILE MATRIX CONTAINERS OF DIGITAL DATA IN LENSLESS SCHEME WITH SPATIALLY INCOHERENT ILLUMINATION

Experiments on optical encryption and numerical decryption of new versatile matrix containers of digital data in a lensless scheme of optical encryption with spatially incoherent illumination have been carried out. The number of errors in decrypted images did not exceed 0.8 %. The information in the decrypted images was decoded without errors thanks to the built-in error correction code.

Проведены эксперименты по оптическому кодированию и численному декодированию цифровых данных, упакованных в новые универсальные матричные контейнеры, в безлинзовой схеме оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением. Отличительной чертой разработанных контейнеров является отсутствие демаскирующих элементов, таких как прямые линии границ изображения и опорные точки, которые присутствуют в таких популярных контейнерах как QR-коды. Пример нового контейнера цифровых данных приведён на рис. 1а.

Схема экспериментальной установки (рис. 1б) построена на базе двух жидкокристаллических пространственно-временных модуляторов света (ЖК ПВМС). Особенностью предложенной схемы является использование в качестве кодирующего элемента дифракционного

оптического элемента (ДОЭ), формирующего в плоскости фотосенсора требуемую функцию рассеяния точки (ФРТ), являющуюся ключом кодирования, при освещении ДОЭ расходящейся сферической волной.

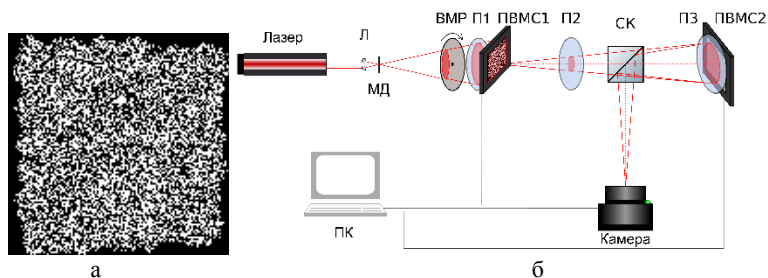


Рис. 1. Универсальный матричный контейнер цифровых данных (а); безлинзовая схема оптического кодирования изображений, работающая с пространственно-некогерентным освещением (б)

В экспериментах использовались матричные контейнеры размерами 120×120 , 139×139 и 160×160 отсчётов и степень избыточности (процентом корректируемых ошибок) 15 %. Кодирование проводилось ключами с нормированной средней энергией (НСЭ) 0,001, 0,002 и 0,003. Пример кодирования представлен на рис. 2.

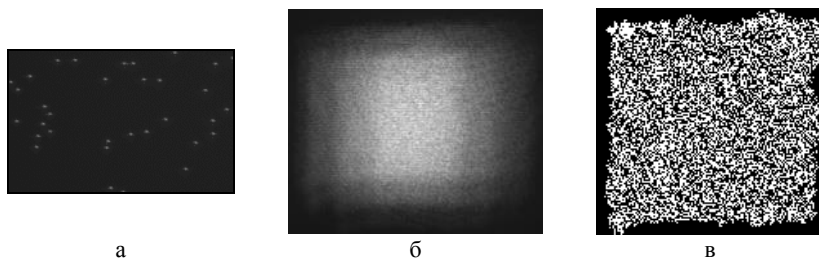


Рис. 2. Ключ кодирования (а); кодированное изображение (б); бинаризованное декодированное изображение (в)

Результаты экспериментов демонстрируют успешное кодирование и безошибочное декодирование цифровой информации на реализованной установке.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 19-19-00498.

Е.Г. ЦИПЛАКОВА¹, М.С. КУЛЯ¹, А.А. ГОРОДЕЦКИЙ^{1,2},
Б.В. СОКОЛЕНКО¹, Н.В. ПЕТРОВ¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург

²Университет Бирмингема, Великобритания

ОПТИМИЗАЦИЯ СООТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В ЗАДАЧЕ КОДИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПУЧКОВ С ОДНОРОДНЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ ЗАРЯДОМ

Продемонстрирован принцип кодирования информации во временном спектре сверхширокополосного волнового пакета, состоящего из интерферирующих однородно-заряженных пучков Лагерра-Гаусса с единичным и нулевым топологическими зарядами. Произведена оптимизация области пространственного детектирования и выбора в спектральных каналах пороговой границы бинарного кодирования.

E.G. TSIPLAKOVA¹, M.S. KULYA¹, A.A. GORODETSKY^{1,2},
B.V. SOKOLENKO¹, N.V. PETROV¹

¹ITMO University, Saint-Petersburg

²University of Birmingham, United Kingdom

SIGNAL-TO-NOISE RATIO OPTIMIZATION IN THE ENCODING ISSUE WITH BROADBAND BEAMS WITH A UNIFORM TOPOLOGICAL CHARGE

The encoding principle of the time spectrum of ultrabroadband wave train consisting of interfering uniformly charged Laguerre-Gaussian beams with unit and zero topological charges is demonstrated. Optimization of the spatial detection area and setting the threshold for binary encoding in spectral channels is performed.

В результате интерференции парных равнозаряженных по спектру вихревых пучков с единичным и нулевым топологическими зарядами в спектре формируется структура [1, 2], представляющая интерес для спектрального кодирования информации. Её особенностью является наличие в спектре образованного в результате интерференции волнового пакета двух винтошених структур, образованных локальными пространственными экстремумами поля, выделяемыми для каждой частоты. Эта винтовая структура при изменении разности хода между интерферирующими пучками деформируется так, что меняется спектральный шаг спирали и толщина витка. В результирующем поле

выделяются спектральные каналы (рис. 1а), вдоль которых производится суммирование амплитуды поля внутри апертуры детектирования.

Целью работы является оптимальный подбор параметров кодирования – пространственной области детектирования и границы 0/1.

Благодаря хиральности деформации винтовых структур пространственных экстремумов поля при смещении разности хода по разные стороны от нулевого положения [2], имеется возможность оптимизации ориентации и выбора формы детектирующей апертуры, чтобы вполнину редуцировать сложность задачи поиска оптимального значения пороговой границы бинарного кодирования. Оптимальным решением является апертура в виде сегмента круга (рис. 1б), который ориентирован так, что биссектриса его угла становится перпендикулярна линии, соединяющей центры пространственного минимума и максимума амплитуды поля во временной области для нулевой разности хода, которая соответствует случаю, когда центры масс интерферирующих пучков по временной координате совпадают. При такой ориентации апертуры необходимо подобрать только половину оптимальных значений пороговой границы. Вторая половина значений для комплиментарного набора состояний автоматически получается путем простой смены знака у величины линии задержки, определяющей разность хода. Что и было сделано для конфигурации с тремя спектральными каналами (рис. 1в).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект № 19-72-10147).

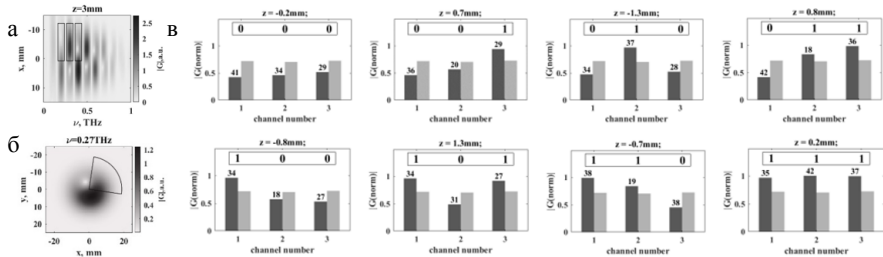


Рис. 1. Спектральные каналы (а); расположение детектирующей апертуры в поперечном сечении поля (б); диаграммы эффективности кодирования информации на трёх спектральных каналах (в): чёрные столбцы – пространственно-спектральная сумма нормированной амплитуды в каналах (значение на столбце показывает отклонение от границы в процентах), серые столбцы – граница 0/1, z – положение линии задержки, обеспечивающей состояние

Список литературы

1. Kulya M.S., et al. // Proc. SPIE. 2020. V. 11307. P. 113070J.
2. Petrov N.V., et al. // Proc. SPIE. 2020. V. 11499. P. 114990J.

В.И. НИКИТЕНОК, С.С. ВЕТОХИН¹, В.А. САЕЧНИКОВ,
А.А. СВИРИДОВ

Белорусский государственный университет, Минск
¹*Белорусский государственный технологический университет, Минск*

ПОК-АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СЛАБЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В НЕОПРЕДЕЛЁННЫХ УСЛОВИЯХ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ИЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО КОНТРАСТОВ

Представлены результаты разработки оптимальных последетекторных алгоритмов обнаружения слабых оптических сигналов в неопределённых условиях вида контраста (ПОК–алгоритмы): варианты структурных схем оптимальных алгоритмов обнаружения, рабочие характеристики для случаев положительного и отрицательного контрастов, их сравнительный анализ.

V.I. NIKITSIONAK, S.S. VETOKHIN¹, V.A. SAECHNIKOV,
A.A. SVIRIDOV

Belarusian State University, Minsk
¹*Belarusian State Technological University, Minsk*

PNC-ALGORITHMS OF WEAK OPTICAL SIGNALS DETECTION UNDER INDEFINITE KIND OF POSITIVE OR NEGATIVE CONTRAST

The results of the development of optimal after-detector algorithms of weak optical signals detection under indefinite kind of a contrast (PNC) are represented. There are some variants of block-diagrams of the optimal algorithms of detection and their operating characteristics for the cases of positive and negative contrast as well as their comparative analysis are given.

Понятие «слабый оптический сигнал» применяется в связи с его приёмом на уровне фотонов [1, 2] и при определённых условиях приемлемой оказывается стационарная пуассоновская модель. При этом на выходе детекторов излучения наблюдается одноимённый поток коротких видеоимпульсов, описываемый пуассоновским и экспоненциальным (используется в работе) законами распределения. Обнаружение может осуществляться в неопределённых условиях положительного и отрицательного контрастов. Например, в космосе в

ночных условиях с подсветкой объектов обнаружения (положительный контраст) и (или) на фоне Земли (отрицательный контраст).

Целью работы является разработка и анализ оптимальных последетекторных алгоритмов обнаружения слабых оптических сигналов в неопределённых условиях положительного или отрицательного вида контраста (ПОК-алгоритмы).

Для достижения указанной цели в работе разработаны структурные схемы оптимальных алгоритмов обнаружения. Введены и обоснованы названия ПОК-алгоритм и ПОК-процессор, как совмещённые структуры, работающие как при положительном, так и при отрицательном контрастах.

Оптимальный ПОК-алгоритм обнаружения при неопределённости относительно вида контраста в целом можно получить их объединением с учётом порогов обнаружения. Он включает следующие операции: измерение времени приёма заданного количества видеоимпульсов, сравнение его с порогом решения для положительного и отрицательного контрастов.

Показатели качества ПОК-алгоритма, подтверждают его работоспособность в различных режимах работы. Эффективность работы ПОК-алгоритма в режиме «положительный контраст» меньше, чем в режиме «отрицательный контраст» и составляет 0,9 - 0,41.

Выявлено замечательное свойство ПОК-алгоритма: устойчивость к увеличению интенсивности фона (или шума). Если это увеличение ведет к увеличению заданной условной вероятности ложной тревоги в режиме «положительный контраст», то в режиме «отрицательный контраст» этот показатель оказывается даже меньше заданного.

На базе полученных ПОК-алгоритмов могут быть разработаны ПОК-процессоры, аналоговые или аналого-цифровые (например, с использованием определённой части аналогового оптического тракта с цифровым выходом [3]).

В связи с этим для неопределённых условий положительного и отрицательного контрастов ПОК-процессор может оказаться предпочтительнее применения известного более сложного ПУЛТ-процессора, обеспечивающего устойчивость за счёт адаптации порога обнаружения.

Список литературы

1. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. М.: Связь, 1971.
2. Ветохин С.С., Резников И.В. Диссекторы – счетчики фотонов // Оптико-механическая промышленность. 1980. № 8. С. 46-50.
3. Стариков Р.С. Фотонные АЦП // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 2.

Ю.Х. ИСМАНОВ, Н.К. ДЖАМАНКЫЗОВ, К.М. ЖУМАЛИЕВ,
С.А. АЛЫМКУЛОВ

Институт физики НАН Кыргызской Республики, Бишкек

ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ САМОРЕПРОДУКЦИЙ

Показано, что конечные размеры решётки почти не влияют на вид волнового поля, формируемого при освещении периодического объекта когерентной волной при выполнении определённых соотношений между длиной освещающей волны и размерами периодического объекта.

Yu.Kh. ISMANOV, N.K. DZHAMANKYZOV, K.M. ZHUMALIEV,
S.A. ALYMKULOV

Institute of Physics of NAS of Kyrgyz Republic, Bishkek

INFLUENCE OF THE FINITENESS OF PERIODIC OBJECTS ON THE QUALITY OF RESTORATION OF SELF-REPRODUCTIONS

It is shown that the finite dimensions of the grating have almost no effect on the form of the wave field formed when a periodic object is illuminated with a coherent wave when certain relationships are satisfied between the length of the illuminating wave and the dimensions of the periodic object.

Рассмотрим влияние конечности периодических объектов на чёткость восстановления последовательности саморепродукций [1 - 5]. Зададим апертуру решётки в виде

$$L(x_0, y_0) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x_0| \leq l, |y_0| \leq l \\ 0 & \text{при } |x_0| > l, |y_0| > l \end{cases} \quad (1)$$

где $2l$ – размеры решётки, (x_0, y_0) – координатная плоскость решётки. Поле на удалении z от плоскости решётки, с ограниченными размерами показано в соотношении (2). $Fr(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp(iy^2) dy$ – выражение, описывающее спираль Корню. Для $Fr(x)$ должно выполняться условие

$\lim Fr(\eta) = \frac{1}{2}(1+i)$, если $\eta \rightarrow \infty$. Если выполняется условие $\eta \gg 1$, то

волновое поле за решёткой, имеющей ограниченные размеры, приблизительно совпадает с волновым полем за решёткой, имеющей неограниченные размеры.

$$v_z(x, y, z) = 1/2\lambda z \exp(ikz) \sum_{n=-L}^L b_n \exp \left[i2\pi \left(\frac{nx}{d} - \frac{n^2 \lambda z}{2d^2} \right) \right] \times \\ \times \left\{ Fr \left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} (l-y) \right] - Fr \left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} (-l-y) \right] \right\} \sqrt{\frac{\lambda z}{2}} \exp \left(-i \frac{\pi}{\lambda z} x^2 \right) \times \\ \times \left\{ Fr \left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} \left(l-x + \frac{n\lambda z}{2d^2} \right) \right] - Fr \left[\sqrt{\frac{\pi}{\lambda z}} \left(-l-x + \frac{n\lambda z}{2d^2} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что конечные размеры решётки почти не влияют на вид волнового поля, если выполняется условие

$$l - 2Lmd - |x| \gg d\sqrt{2m/\pi}. \quad (3)$$

Соотношение (3) указывает на то, что влияние на размытие волнового поля вблизи краев оказывает дифракция на области размером $2l$ для апертуры, имеющей размеры близкие к $\sqrt{\lambda z}$. Помимо этого контрастность поля определяется также пространственными гармониками, которые распространяются наклонным образом в области, апертура которой ограничена пределами $\sim L\lambda z/d$.

Список литературы

1. Maripov A., Ismanov Y. The Talbot effect (a self – imaging phenomenon) in holography // Journal of Optics (0150-536X). 1994. V. 25. No. 1. P. 3-8.
2. Исманов Ю.Х., Исмаилов Д.А., Жумалиев К.М., Алымкулов С.А. Эффект саморепродуцирования в голографии // VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2017. С. 646-647.
3. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer // Optical Engineering. 2018. V. 57(12). P. 124106.
4. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 2. С. 20-23.
5. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА. 2015. № 4(40). С. 194-198.

А.В. КОЗЛОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕКОНСТРУКЦИИ
3D-ОБЪЕКТОВ С ГОЛОГРАММ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ
ФИЛЬТРАЦИИ ИНТЕРПОЛИРОВАННОГО
ВОССТАНОВЛЕННОГО ПОЛЯ**

В работе предлагается метод повышения качества реконструкции 3D-объектов с цифровых голограмм на основе совместного применения интерполяционных алгоритмов и компьютерной фильтрации. Получено улучшение качества восстановленных изображений по сравнению со стандартной фильтрацией.

A.V. KOZLOV, P.A. CHEREMKHIN

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

**IMPROVEMENT OF 3D-OBJECTS HOLOGRAM
RECONSTRUCTION BY DIGITAL FILTERING
OF INTERPOLATED RECOVERED FIELD**

Method of improvement of reconstruction of 3D-objects from digital holograms is proposed. It is based on interpolation and digital filtering. Quality of reconstructed images is improved in comparison with standard filtering application.

Голографическая регистрация изображений с помощью цифровой камеры нашла широкое применение в медицине, биологии, при кодировании и др. К числу основных проблем в цифровой голографии относится устранение ухудшающих качество восстановленных изображений эффектов, связанных как и со схемами записи голограмм [1], так с параметрами камер [2]. К числу наиболее распространённых подходов повышения качества изображений относится фильтрация в плоскости восстановления изображения: медианная, фильтр Ли, VM3D и др. [3]. В настоящей работе предлагается метод, использующий увеличение статистической базы пикселей для подготовки к фильтрации и последующего возвращения изображения к начальному размеру. Увеличение числа пикселей проводится при помощи интерполяционных алгоритмов. На рис. 1а показан фрагмент восстановленного поля с голограммы (без шумов), включающий часть элементов 3D-объекта (сфокусированной и двух несфокусированных сцен) и нулевого порядка дифракции. Для проверки работы метода на голограмму накладывались

пуассонов (как временной шум), гауссов (как пространственный шум) и спекл-шумы. Примеры восстановленных изображений с голограммы (нормированное среднеквадратическое отклонение (НСКО) равно 0,40), после медианного фильтра (НСКО = 0,23) и предлагаемого метода (НСКО = 0,18) даны на рис. 1б - 1г. На рис. 2 приведены зависимости качества восстановления одной из сцен объекта от максимального уровня сигнала голограммы. Предлагаемый метод позволяет улучшить качество восстановления на 15 ÷ 70 %, в том числе на 22 ÷ 40 % относительно стандартного фильтра. Таким образом, метод позволяет повысить эффективность работы фильтров с помощью интерполяции.

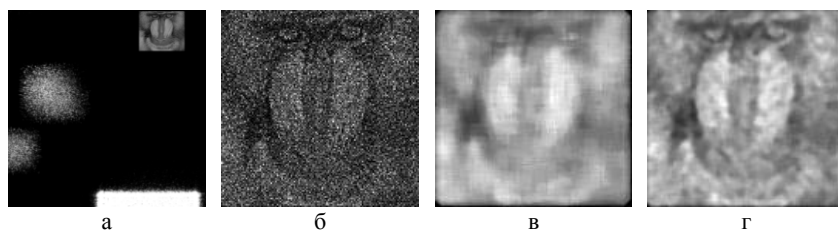


Рис. 1. Фрагмент восстановленного поля с идеальной голограммы, включающего часть элементов 3D-объекта и нулевого порядка дифракции (а); восстановленные изображения с зашумленной голограммы: без фильтрации (б), после применения медианного фильтра (в), после применения фильтра и интерполяции (г)

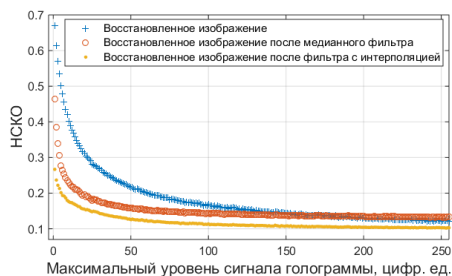


Рис. 2. Зависимости качества восстановленного изображения (по величине НСКО) от максимального уровня сигнала голограммы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Picart P., Li J.-C. Digital Holography. Hoboken-London: Wiley, 2012.
2. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 53-64.
3. Ren R., Jia Z., Yang J., Kasabov N., Huang X. // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 52155-52167.

Д.А. РЫМОВ, Р.С. СТАРИКОВ, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГОЛОГРАММ 3D-СЦЕН НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Методы, основанные на машинном обучении, находят всё большее применение в области оптики и фотоники, в частности, в последние годы, в цифровой голографии. Для возможности восстановления голограмм 3D-сцен предложен метод, использующий нейронные сети. Проведено сравнение результатов его применения со стандартным восстановлением изображений.

D.A. RYMOV, R.S. STARIKOV, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

MACHINE LEARNING-BASED 3D-OBJECTS HOLOGRAM RECONSTRUCTION

Lately machine learning-based methods have found various uses in optics and photonics. Model of neural network was trained to perform 3D-objects reconstruction from digital holograms. A set of holograms, reconstructed with the trained model was compared against images, reconstructed with the direct diffraction propagation method.

В области информационной оптики активно развиваются методы, основанные на машинном обучении [1, 2]. Они могут значительно ускорить расчёты в сравнении с традиционными [3]. Например, качественное восстановление изображений с цифровых голограмм 3D-сцен может быть трудоёмко из-за расположенного в объёме среды множества объектов, перекрывающих друг друга при восстановлении, из-за осевой схемы записи и наложения нежелательных порядков дифракции и др. Машинное обучение может позволить восстанавливать объектную информацию по всем плоским сечениям сцены без перекрытия сфокусированных изображений объектов с несфокусированными.

Для демонстрации предлагаемого метода нейронная сеть была обучена процессу восстановления изображений с голограмм 3D-сцен. Трёхмерные сцены состояли из набора плоских сцен. На вход сети подавалась голограмма, на выход – исходный набор плоских сцен. Для проверки сети синтезировался дополнительный набор голограмм, не участвовавших в обучении. На рис. 1а показан пример такой синтезированной цифровой голограммы 3D-сцены, состоящей из 4 плоских сцен (рис. 1б). На рис. 1в

даны результаты восстановления сечений сцены, формирующих сфокусированные элементы в 4 плоскостях, с помощью сети. Средние значения индекса структурного сходства (ИСС) по 100 голограммам 3D-сцен, состоящих из 4 плоских сцен, для каждой плоскости составили: 0,822, 0,732, 0,693, 0,677. По сравнению со стандартным восстановлением предложенный метод не требует дополнительной обработки. В результате объекты находятся в фокусе и их изображения меньше пересекаются друг с другом. При стандартном же восстановлении, комбинация этих факторов приводит к тому, что значение ИСС будет близким к нулю.

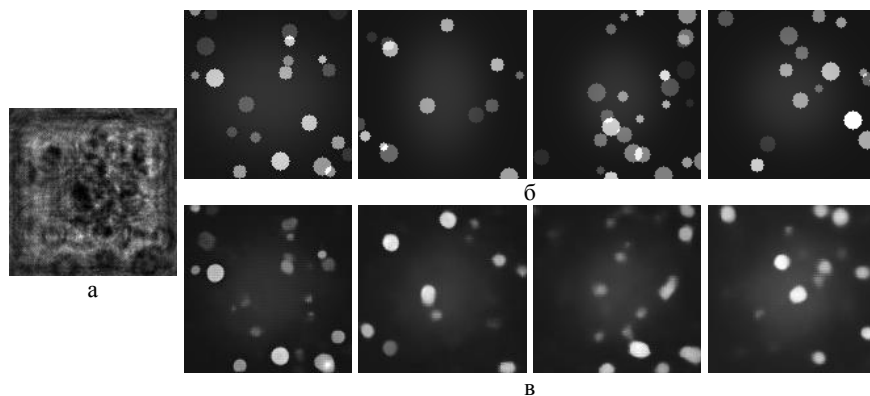


Рис. 1. Голограмма 3D-сцены (а), состоящая из 4 плоских сцен (б); восстановленные изображения соответствующих сечений, полученные с использованием обученной модели (в)

Таким образом, как по визуальной оценке, так и по количественным параметрам обученная модель позволила восстанавливать изображения достаточно высокого качества. При этом изображения свободны от нежелательных порядков дифракции, а также практически отсутствует перекрестное влияние несфокусированных объектов на сфокусированные.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Jo Y., Cho H., Lee S., et al. // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2018. V. 25. № 1. P. 1-14.
2. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Rymov D.A., Starikov R.S. // Procedia Computer Science. 2020. V. 169. P. 440-444.
3. Rivenson Y., Zhang Y., Gunaydin H., et al. // Light Sci. Appl. 2017. V. 7. P. 17141-17141.

П.В. ПАВЛОВ, М.Н. НЕРУШ, Р.Г. ХОБТА

*Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
Воронеж*

ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАЦИОННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЕФЕКТОВ ОСТЕКЛЕНИЯ КАБИН САМОЛЁТОВ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГОЛОГРАФИИ

Рассматриваются результаты применения метода итерационного восстановления изображений дефектов остекления кабин летательных аппаратов для определения их параметров при неразрушающей контроле. Показана применимость метода, что позволит в дальнейшем разработать методику дефектоскопического контроля элементов остекления кабин воздушных судов.

P.V. PAVLOV, M.N. NERUSH, R.G. KHOBTA

Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh

ITERATIVE AIRCRAFT GLASING DAMAGES IMAGES RETRIEVING METHOD IN DIGITAL HOLOGRAPHY

The results of an iterative image retrieving method application for non-destructive testing of glazing elements are examined. Correctness of this method is shown, which make it possible to further develop a method for defectoscopic inspection of glazing elements of aircraft cockpits.

При эксплуатации авиационной техники остекление фонаря кабины подвергается негативному воздействию ультрафиолетового излучения, аэродинамических нагрузок и перепадов температуры, что приводит к появлению, развитию и накоплению в органическом стекле различных дефектов, а в конечном счёте и к разрушению остекления. Используемые в настоящее время оптические устройства неразрушающего контроля элементов остекления не позволяют точно определить параметры таких дефектов, и оценка производится визуально, что приводит к ошибкам вследствие человеческого фактора.

Для точного определения параметров дефектов предлагается использовать метод компьютерной голографии, основанный на явлениях интерференции и дифракции волн рассеянного дефектом лазерного излучения, проходящего сквозь элемент остекления.

В ходе эксперимента осуществлялась запись голограмм по осевой схеме Габора [1]. В качестве объекта использовался образец авиационного органического стекла марки АО-120А толщиной 10 мм, на переднюю и заднюю грани которого были нанесены контрольные метки в виде горизонтальной и вертикальной царапины. К полученной голограмме был применён метод итерационного восстановления изображений [2], для последующего визуального определения положения дефектов по формированию чёткого контура царапин. Плоскости наблюдались на расстояниях от камеры 51,6 мм для горизонтальной и 59,6 мм для вертикальной метки соответственно. С учётом того, что показатель преломления образца равен 1,25, полученные значения соответствуют толщине образца 10 мм. На рис. 1 показаны полученная голограмма, изображение, восстановленное по приближению Френеля и изображение, восстановленное с применением итерационного метода.

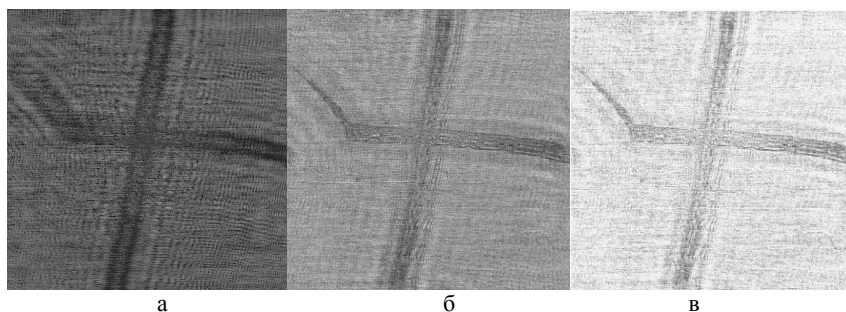


Рис. 1. Голограмма (а); изображение, восстановленное по приближению Френеля (б); изображение, восстановленное с применением итерационного метода (в)

Таким образом, метод итерационного восстановления из цифровых голограмм улучшает качество изображений и уменьшает количество дифракционных помех, что позволит повысить точность дефектоскопического контроля элементов остекления кабин летательных аппаратов и автоматизировать процесс определения параметров дефектов (геометрические размеры и глубина залегания трещин).

Список литературы

1. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. М.: Наука, 1982.
2. Lатышевская Т. Solution to the twin image problem in holography // Physical Review Letters. 2007.

Г.Н. ВИШНЯКОВ, В.Л. МИНАЕВ, А.Д. ИВАНОВ

*Всероссийский научно-исследовательский институт
оптико-физических измерений, Москва*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАДРОЛИНЗЫ ДЛЯ СДВИГОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Предложен новый оптический элемент – квадроллинза, которая использована в составе сдвигового спекл-интерферометра для обеспечения измерений напряжённно-деформированных состояний объектов одновременно в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

G.N. VISHNYAKOV, V.L. MINAEV, A.D. IVANOV

All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow

USING A QUADROLENSE FOR SHEARING SPECKLE INTERFEROMETRY

A new optical element – a quadrolens that is used as part of a shearing speckle interferometer to provide the measurements of stress-strain states of objects simultaneously in two mutually perpendicular directions, has been proposed.

Основным элементом сдвигового спекл-интерферометра (шерографа) является оптическая система, которая создаёт поперечно-сдвинутые друг относительно друга изображения объекта. При регистрации на приёмнике происходит их интерференция и образуется интерферограмма в полосах конечной ширины. В работе предложен новый оптический элемент на основе разрезной линзы – квадроллинза. Он представляет собой четыре одинаковых сектора, вырезанных из исходной круглой линзы и разнесённых друг от друга с образованием равномерных зазоров. Каждый из четырёх секторов квадроллинзы строит сфокусированное изображение объекта в одной единой для всех секторов плоскости. Эти изображения будут смещены друг относительно друга в плоскости изображений из-за того, что оптические оси секторов квадроллинзы смещены относительно оси исходной линзы. Так как эти смещённые изображения образованы делением одного волнового фронта излучения, отражённого от объекта, они создают сдвиговые спекл-интерферограммы, полосы которых имеют равную частоту и разную ориентацию. Поэтому, с помощью квадроллинзы можно производить сдвиг изображений в четырёх направлениях, избежать дефокусировки и применить метод пространственного фазового сдвига с использованием преобразования Фурье.

Ч.Б. КАЙТУКОВ, В.А. КИСЕЛЕВ, А.В. ЯНОВСКИЙ

Научно-технический центр "Атлас", Москва

СОЗДАНИЕ ГОЛОГРАММ С ВИЗУАЛЬНЫМИ ЭФФЕКТАМИ ПОЛНОЦВЕТНОГО И ОБЪЁМНОГО ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлена технология создания одиночных изобразительных голограмм с использованием отдельно созданных: матрицы с дифракционными решётками, немодулированными по интенсивности, и амплитудной маски, рассчитанной и созданной в соответствии с требуемым дизайном.

Ch.B. KAYTUKOV, V.A. KISELEV, A.V. YANOVSKY

Scientific and Technical Centre «Atlas», Moscow

CREATING HOLOGRAMS WITH VISUAL EFFECTS OF FULL COLOR AND VOLUME IMAGES

The technology of creating single imaging holograms using separately created ones is presented: matrices with diffraction gratings unmodulated in intensity; and an amplitude mask calculated and created according to the required design.

Изготовление радужных голограмм по уникальному дизайну, является сложным и дорогостоящим технологическим процессом. Для снижения технологической сложности процесса создания голограммы предлагается разделить изготовление её фазовой и амплитудной компонент. Фазовая компонента голограммы представляет собой подложку (пластину), полностью заполненную на поверхности дифракционными решётками трёх периодов. Дифракционные решётки не модулированы ни по глубине рельефа, ни по занимаемой площади. При правильном соотношении площадей отведённых под разные цвета, такая пластина должна выглядеть как яркая белая поверхность.

Амплитудная компонента представляет собой маску с просветами определённой площади напротив пикселей матрицы дифракционных решёток каждого цвета. Размеры просветов варьируются в зависимости от компонент R, G и B каждого пикселя в исходном файле изображения, и модулируют интенсивность света прошедшего к поверхности дифракционных решёток и, как следствие, направленного в сторону наблюдателя. Совмещение фазовых решёток и амплитудной маски приводит к изменению соотношений между интенсивностью цветовых компонент пикселей и получению полноцветного изображения.

Е.А. КУРБАТОВА, В.Г. РОДИН, П.А. ЧЕРЁМХИН
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

АДАПТИВНЫЙ ПОДБОР ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОПЕРАЦИИ ДИФФУЗИИ ОШИБКИ ДЛЯ БИНАРИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ

В работе предложен метод адаптивного подбора матрицы весовых коэффициентов процедуры диффузии ошибки для задачи бинаризации цифровых голограмм. Проведена оценка качества восстановленных изображений. Определены оптимальные параметры матриц весовых коэффициентов.

E.A. KURBATOVA, V.G. RODIN, P.A. CHEREMKHIN
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute)

ADAPTIVE SELECTION OF ERROR DIFFUSION WEIGHTS FOR DIGITAL HOLOGRAMS BINZRIZATION

Method of adaptive selection of error diffusion weights for digital hologram binarization is proposed. Quality of reconstructed images is estimated. Optimal parameters of weights are determined.

Бинаризация цифровых голограмм – способ обработки файлов голограмм для сжатия информации, печати и, в частности, для их вывода на высокоскоростные микрозеркальные модуляторы света [1] и др. Диффузия ошибки – один из типов алгоритмов бинаризации голограмм, обеспечивающий весьма высокое качество восстановленных изображений [2-4]. Он основан на распространении некоторого значения – «ошибки» между элементами файла цифровой голограммы. За направление и величину распространяемой ошибки отвечает матрица весовых коэффициентов. Существует множество различных реализаций процедуры диффузии ошибки, для каждой из которых матрица подбирается индивидуально [5].

Разработан итеративный метод адаптивного подбора весовых коэффициентов с большим (более 15) числом элементов. Первоначально оценивается качество восстановления в случае использования некоторой начальной матрицы. Далее значения коэффициентов последовательно изменяются, для каждого случая проводится оценка метрик качества. В случае если качество повышается, значение коэффициента сохраняется. Если качество снижается, сохраняется предыдущее значение

коэффициента. На рис. 1 приведены примеры начальных матриц. На рис. 2 представлены восстановленные изображения с голограмм, бинаризованных с использованием стандартного метода Флойда-Стенберга (рис. 2а) и итеративным методом адаптивного подбора весовых коэффициентов (рис. 2б - 2г). Наиболее высокое качество достигнуто при использовании матрицы с 34 коэффициентами (рис. 1в). Значения метрик качества в случае предлагаемого адаптивного подхода по сравнению со стандартными методами диффузии ошибки оказались выше на 13 - 15 %.

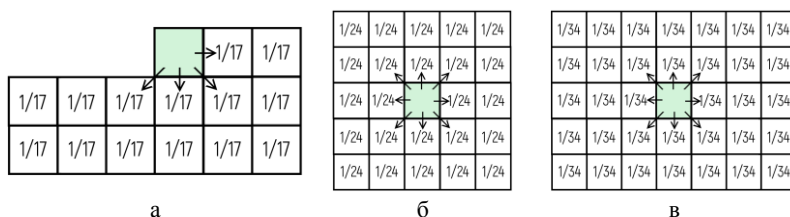


Рис. 1. Начальные матрицы диффузии ошибки с 17 (а), 24 (б) и 34 (в) весовыми коэффициентами для метода адаптивного подбора весовых коэффициентов

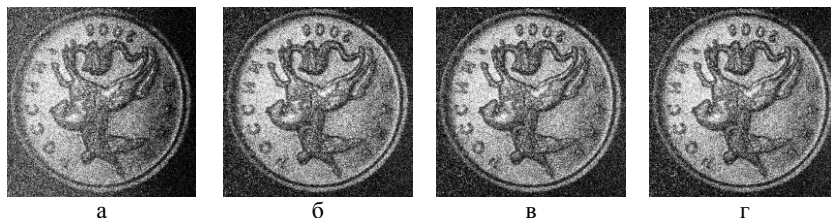


Рис. 2. Примеры изображений, восстановленных с голограмм, бинаризованных диффузией ошибки: Флойда-Стенберга (а) и с адаптивным подбором весовых коэффициентов (б - г) с использованием начальных матриц из рис. 1

Таким образом, разработанный метод адаптивного подбора весовых коэффициентов существенно повысил качество бинаризации голограмм

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

Список литературы

1. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. // Opt Lasers Eng. 2019. V. 115. P. 119-130.
2. Yang G., Jiao S., Liu J.-P., Lei T., Yuan X. // Appl. Opt. 2019. V. 58. P. 5547-5555.
3. Min K., Park J.-H. // Optics Express. V. 28. P. 38140-38154.
4. Курбатова Е.А., Родин В.Г., Черёмхин П.А. // Автотметрия. 2020. Т. 56. № 2. С. 118-125.
5. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. // Proceedings of Digital Holography & 3-D Imaging, Optical Society of America, Bordeaux, France, 2019. P. Th3A.22.

**В.В. КРАСНОВ, Д.Ю. МОЛОДЦОВ, В.Г. РОДИН,
П.А. ЧЕРЁМХИН, Р.С. СТАРИКОВ**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БИНАРНЫХ АМПЛИТУДНЫХ ГОЛОГРАММ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ФУРЬЕ И ХАРТЛИ

Выполнен компьютерный синтез амплитудных голограмм с использованием преобразования Хартли. Получено, что по своим основным характеристикам такие голограммы не уступают амплитудным голограммам, синтезированным с использованием преобразования Фурье.

**V.V. KRASNOV, D.Yu. MOLODTSOV, V.G. RODIN,
P.A. CHEREMKHIN, R.S. STARIKOV**

National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)

COMPARATIVE ANALYSIS OF BINARY AMPLITUDE HOLOGRAMS SYNTHESIZED USING FOURIER AND HARTLEY TRANSFORMS

Computer synthesis of amplitude holograms using Hartley transform is performed. It is found that main characteristics of such holograms are not worth than the characteristics of amplitude hologram synthesized using Fourier transform.

В настоящее время синтезированные голограммы успешно применяют в оптических информационных устройствах, осуществляющих операции оптического распознавания и оптического кодирования. Используемое при синтезе таких голограмм преобразование Фурье всегда осуществляется в комплексной плоскости, в том числе и для действительных функций, которыми обычно описываются записываемые на голограммы образы объектов. Отличительной особенностью интегрального преобразования Хартли является то, что образ действительной функции всегда является действительным, поэтому это преобразование удобно использовать при компьютерном синтезе именно амплитудных голограмм, вывод которых может быть осуществлён с помощью микрозеркального модулятора.

Был проведён синтез бинарных и многоградационных амплитудных голограмм с использованием преобразований Фурье и Хартли для различных изображений контурных и неконтурных объектов. Объекты имели размеры 128 на 128 отсчётов, которые могли принимать значения от

0 до 255, и различались как по форме, так и по степени заполненности изображений ненулевыми отсчётами, которая вычислялась как отношение средней величины значений отсчётов к максимальному значению отсчёта в изображении. Учитывая, что вывод голограмм будет производиться с помощью микрозеркальных модуляторов, которые осуществляет бинарную амплитудную модуляцию, синтезированные голограммы подвергались операции бинаризации.

Проведён сравнительный анализ синтезированных с использованием преобразований Фурье и Хартли голограмм по выборке контурных (1-6) и неконтурных бинарных (7, 8), а также полутоновых (9-12) изображений. В качестве параметров для сравнения были выбраны полная дифракционная эффективность по восстановленному изображению (рис. 1) и среднеквадратическое отклонение (СКО) интенсивности восстановленного изображения от исходного (рис. 2).

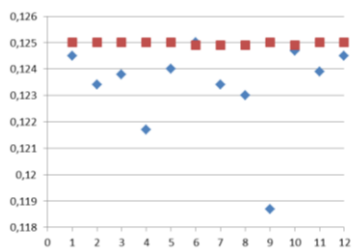


Рис. 1. Гистограмма сравнения полной дифракционной эффективности голограмм

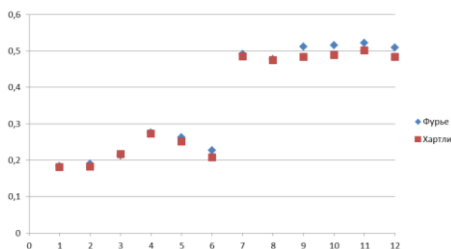


Рис. 2. Гистограмма сравнения СКО интенсивности восстановленного изображения

Как показал анализ, сравниваемые характеристики голограмм отличаются не более, чем на 6 %, причём, дифракционная эффективность бинаризованных голограмм, синтезированных с применением преобразования Хартли лучше, чем у голограмм, синтезированных с использованием преобразования Фурье. Учитывая, что при синтезе голограмм с применением преобразования Хартли осуществляется в два раза меньше операций, в отличие от использования преобразования Фурье, а также, что быстродействие микрозеркальных модуляторов выше, чем модуляторов других типов, совместное применение таких голограмм и модуляторов, особенно обосновано в высокоскоростных устройствах, где требуется оперативный синтез и вывод голограмм-фильтров.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 20-79-00291.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

-А-

Авакянц Л.П. 63
Аверин С.В. 381
Авершин А.А. 405
Авласевич Н.Т. 443, 463
Агрузов П.М. 161
Аймуханов А.К. 219, 223
Акимов А.А. 127
Акимова Я.Е. 415, 433
Акмалов А.Э. 87, 91, 141, 325
Алатырев А.Г. 91, 325
Алексеев Е.Е. 283
Алексеев И.В. 189
Алексеев Н.А. 287, 289, 291
Алымкулов С.А. 475
Амброзевич С.А. 227, 231, 245
Ан П.П. 385
Андреев С.Н. 85, 401
Андреева О.Б. 271
Андропова Н.М. 105, 283
Антипов А.А. 103
Антонов Е.А. 345
Аракелян С.М. 37
Арешкин А.Г. 203
Арсенин А.В. 77, 205, 213
Артамонов Д.А. 251
Асеев В.А. 65
Асташкевич С.А. 267, 269
Ахматханов А.Р. 35, 47

-Б-

Бабкина А.Н. 207
Баззал Х. 289, 291
Бакунов М.И. 51
Балакирева И.В. 399
Балан Н.Н. 393
Барнинова О.П. 349
Барма Д.Д. 451, 455
Баско Е.А. 317
Безрук М.Н. 173, 429
Безуглов Н.Н. 277
Беспалов Н.С. 53

Бикбаев Р.Г. 247, 259
Благов А.Е. 341
Блинов И.Ю. 111, 167, 399
Бобруйко Д.А. 429
Богачков И.В. 351, 355, 357, 359, 363, 453
Богданов А.А. 129, 143
Бодренин В.Е. 331
Бодяго Е.В. 199
Бойко А.А. 35
Бойченко А.П. 67, 209
Боровых С.В. 305
Брецко В.В. 415, 433
Брецько М.В. 415, 433
Бугай А.Н. 377
Булатов К.М. 157, 387
Бульга Д.В. 225
Буримов Н.И. 53
Бурмистров Е.Р. 63
Буряков А.М. 117, 257, 263
Бусурин В.И. 419, 423
Буть А.И. 449
Бухаров Д.Н. 37
Быков А.А. 157
Быковский А.Ю. 179

-В-

Ванюшин М.В. 327
Варламов П.В. 307
Васецкий С.О. 423
Васильев Д.Д. 89, 93, 265
Васильев Р.Б. 231, 243
Васильева А.В. 329
Вашукевич Е.А. 133
Ведяшкина А.В. 431
Векшин М.М. 395
Величко Е.Н. 435
Велюхова О.Ю. 435
Венедиктов И.О. 385
Вердиев Б.И. 91, 325
Ветохин С.С. 473
Ветров С.Я. 247, 259
Видувилт Т. 143

Викторов Е.А. 277
Виноградова П.В. 261
Витухновский А.Г. 153
Вишнеый А.А. 205
Вишняков Г.Н. 483
Войцеховский А.В. 215, 233
Волков В.Г. 389, 397
Волков В.С. 77, 205, 213
Волчков С.С. 25
Волынец А.Б. 43
Волынский М.А. 187
Ворзобова Н.Д. 191
Воронов А.А. 213
Воропаев К.О. 113
Воропай Е.С. 289, 291
Восканов М.Л. 407
Воскресенский В.М. 41
Вохник О.М. 109

-Г-

Габитов И.Р. 22
Гавриш С.В. 309
Газизов А.Р. 235
Гайнутдинов Р.Х. 371
Галуцкий В.В. 333, 339
Ганжерли Н.М. 457
Гарифуллин А.И. 371
Гарнаева Г.И. 465
Гейвандов А.Р. 455
Герасименко В.С. 161
Герасименко Н.Д. 161
Герасимова Ю.А. 299
Гибни Д. 22
Гилев Д.Г. 145
Гиндин П.Д. 389, 397
Глыбовский С.Б. 129
Голиков А.Д. 385
Головань Л.А. 217
Голубев Ю.М. 133
Голубева Т.Ю. 133
Гольцман Г.Н. 385
Горбатова А.В. 117, 257, 263
Горн Д.И. 233
Городецкий А.А. 29, 471
Горяев М.А. 201
Гошеев А.А. 375
Гранисо Э.А. 229
Графова В.П. 243
Грачёв Н.А. 353

Гревцева И.Г. 69
Грейсух Г.И. 169
Гришачев В.В. 163
Грищенко И.В. 49
Грудцын Я.В. 299
Гудкова Ю.А. 413
Гузаиров С.А. 127
Гуляев С.Н. 457
Гуров И.П. 187

-Д-

Дайбаге Д.С. 227, 231, 237, 239, 243
Данилкин М.И. 237, 239, 243
Данилов П.А. 39
Дац Е.П. 421
Дворецкий С.А. 215, 233
Девецкий О.В. 241
Демидов В.В. 65
Демина Т.С. 285
Демишкевич Е.А. 251
Денисов Д.Г. 151, 155, 403, 441, 451, 455
Дерепко В.Н. 69
Джаманкызов Н.К. 461, 475
Дзядох С.М. 215, 233
Дорошина Н.В. 205, 213
Дубиков А.В. 47
Дунаева Е.Е. 39
Дышлевский В.А. 355, 359
Дю В.Г. 347

-Е-

Евстропьев С.К. 65, 225
Евтихийев Н.Н. 467, 469
Ежов Е.Г. 169
Елезов М.С. 385
Елисеев С.П. 243
Елютин С.О. 121
Елихин В.М. 175
Ермаков О.Е. 129, 143
Ермолаев Г.А. 77
Есеев М.К. 375
Есин А.А. 35, 47
Ефимов Т.А. 421

-Ж-

Жеглов М.А. 419, 423
Железнов В.Ю. 79, 297
Желтиков В.А. 265
Жердев А.Ю. 197

Жигарьков В.С. 27, 83
Жумаева И.О. 113
Жумалиев К.М. 461, 475
Журин Т.А. 347

-З-

Забалуева З.А. 435
Заботнов С.В. 217
Загоруйко К.А. 407
Загогин А.П. 287, 289, 291, 313, 319
Зазымкина Д.А. 101
Зайнуллин Ф.А. 117
Захаров О.А. 169
Захарчук И.А. 227, 231, 237, 239, 243
Зачиняев Ю.В. 413
Звагельский Р.Д. 153
Земченко Г.А. 315
Зиминов А.В. 199
Зимняков Д.А. 25
Зинин П.В. 157, 327, 387
Злоказов Е.Ю. 159, 183, 409
Зозуля А.С. 311
Золна К.А. 131
Золотовский И.О. 391
Золотухина А.А. 403
Зорин Р.С. 165
Зыкова М.П. 349
Зырянова К.С. 207
Зубин А.Ю. 251, 311

-И-

Иванков А.С. 189
Иванов А.А. 61
Иванов А.Д. 483
Иванов В.В. 393
Иванов М.С. 257
Иванов Н.Н. 361
Иванова А.И. 79, 297
Ивановская Е.В. 285
Ивахник В.В. 127, 137
Измайлов Д.В. 307
Ильинский А.В. 255
Ильичев И.В. 161
Ионин А.А. 39, 101, 115, 295
Ионов А.С. 113
Исмаил Р. 193
Исмаилов И.А. 383
Исманов Ю.Х. 445, 461, 475

-К-

Кабанова О.С. 31
Казаков В.А. 221
Казанцев С.Ю. 283, 301, 401
Казин С.В. 169
Кайтуков Ч.Б. 484
Калинина А.А. 195
Калугин А.И. 345
Камбар Д.С. 223
Каплунов И.А. 57, 79, 297
Каргин Ю.Ф. 347
Карманова Н.С. 73
Карнаушкин П.В. 175
Карпов В.В. 389, 397
Кастро Р.А. 255
Касьяненко Е.М. 97
Кацаба А.В. 227, 231
Кашкаров П.К. 217
Каштанова М.С. 317
Кившарь Ю.С. 143
Киняевский И.О. 39, 101, 115, 295, 299
Киселев В.А. 484
Кистенева М.Г. 347
Климачев Ю.М. 101, 115, 295
Климонский С.О. 243
Клишин Ю.А. 77
Ковалев В.И. 39
Коваленко М.Н. 287, 289, 291
Ковальчук М.В. 341
Ковалюк В.В. 385
Кожевников В.А. 281
Кожевникова А.М. 189
Козлов А.В. 407, 477
Козлов А.Ю. 101, 115, 295
Козловский К.И. 141
Козюхин С.А. 217
Кокшина А.В. 221
Колкер Д.Б. 35
Колобкова Е.В. 211
Колчин А.В. 217
Кольмагин Д.А. 153
Комаров Д.А. 295
Комарова О.С. 203
Компанец И.Н. 33
Кондратюк Е.В. 77
Конеев Р.В. 271, 275
Коноплев Г.А. 199, 315
Конради Д.С. 303
Коняшкин А.В. 49

Кордейро Маэриньо Д.А. 245
Корибут А.В. 39, 299
Коркишко Ю.Н. 335
Кормашова Д.И. 101
Коробков К.А. 419
Короленко П.В. 109, 369
Корсаков В. 315
Коршунов В.М. 245
Костарев В.А. 87
Костеников М.А. 53, 449
Кострицкий С.М. 335
Костюк Г.К. 293
Косырев А.В. 369
Котков А.А. 101, 115
Котковский Г.Е. 87, 91, 141, 325
Котликов Е.Н. 365
Котов В.М. 381
Котов О.И. 435
Кочетова В.В. 53, 449
Кочуров Л.А. 25
Кочунов К.В. 199
Кошевараева Н.А. 419
Крайский А.В. 185
Краснов В.В. 467, 469, 487
Краснок А.Е. 73
Кривенков В.А. 59
Криштол В.В. 145, 261
Кроль И.М. 349
Круглов С.К. 411
Кручинин Н.Ю. 249
Кубанов Р.Т. 109
Кугушев Д.Н. 309
Кудрявцев А.А. 267, 269
Кудряшов А.В. 403
Кудряшов С.И. 39
Кузицин Ю.А. 91, 325
Кузнецов А.В. 33
Кузнецов А.И. 315
Кузнецов И.В. 303
Кузнецов П.И. 147
Кузнецов С.А. 389, 397
Кузьменко Н.К. 65, 225
Кузьмич Д.Е. 47
Кук И.А. 22
Кулаков М.Н. 417
Кулешов А.Н. 171
Куликов А.Г. 341
Кульпина Е.В. 207
Кульчин Ю.Н. 173

Куля М.С. 471
Кункель Т.С. 217
Курбатова Е.А. 485
Куручкин Ю.В. 105
Кучеренко М.Г. 249, 253
Кучерик А.О. 37

-Л-

Лаверовская Н.П. 365
Лазаренко П.И. 217
Лампин Ж.-Ф. 101
Лапин В.А. 391
Лебедев В.В. 161
Лебедева Г.К. 199
Леванисов В.А. 449
Лентовский В.В. 203
Ливашвили А.И. 261
Липаткин В.И. 171
Лосев А.С. 123
Лощенов В.Б. 317
Лужков А.А. 201
Луценко А.С. 353
Лушников Д.С. 197
Любынская Т.Е. 321
Ляликов А.М. 443, 447, 463
Ляшко Е.И. 121

-М-

Мазур Л.И. 175
Мазур М.М. 175
Маймистов А.И. 121
Макаров В.И. 317
Макаров Д.Н. 375
Максимов Е.М. 141
Максимова Л.А. 441
Макурин А.А. 211
Малахов К.М. 451
Малинский Т.В. 79, 297
Малохатко М.С. 421
Малыхина И.В. 157
Мандур М.М. 267, 269
Манжула И.С. 261
Маргарянц Н.Б. 187
Маркин В.В. 197
Маркова Л.В. 287
Мартынов И.Л. 91, 325
Марченков Н.В. 341
Маслова Г.Т. 313
Матвеева К.И. 311

Матитал Р.П. 153
Матросова А.С. 65
Маурер И.А. 457
Мельникова Е.А. 31
Меркушев Д.Д. 153
Миколуцкий С.И. 79, 297
Минаев В.Л. 483
Минаев Н.В. 27, 83, 149, 285
Минаева Е.Д. 149, 285
Минаева С.А. 285
Минин И.В. 373
Минин О.В. 373
Миронов М.С. 77, 213
Миронов Ю.Б. 105
Миронова Т.В. 185
Мирошникова Н.Е. 171
Митюрева А.А. 305
Митягин Ю.А. 101
Михайлов Н.Н. 215, 233
Мичулис К. 277
Мишина Е.Д. 117, 263
Мишра П. 77
Могильная Т.Ю. 95
Моисеев К.М. 89, 93, 265
Моисеев С.А. 131
Молодцов Д.Ю. 487
Молчанов В.Я. 55, 177
Молчанов С.В. 57
Морозова Н.С. 317
Музыка А.Ю. 401
Муравлев М.В. 405
Муханов С.А. 85
Мухин Н.В. 199
Мушин Ф.Ю. 253
Мысина Н.Ю. 441

-Н-

Набиев И.Р. 59
Надолинский А.М. 271, 275
Налбандян В.М. 249
Науменко Н.Ф. 55
Неуен Б.Х. 165
Небаевский В.А. 159, 409
Немцов А.Б. 213
Неруш М.Н. 481
Несмелов С.Н. 215, 233
Нефедьев Л.А. 465
Нечипуренко Н.И. 319
Низамова Э.И. 465

Никитенок В.И. 473
Никитин А.Н. 403
Никитин В.А. 367
Никоноров Н.В. 65
Новиков С.М. 205, 213
Новоковская А.Л. 51
Носов П.А. 327, 387

-О-

Обыденнов Д.В. 177
Овеченко Д.С. 209
Овчинников О.В. 69
Огнедюк А.А. 311
Одинокое С.Б. 197
Омарбекова Г.И. 223
Омельченко А.И. 97
Орлов Д.В. 217
Осадченко А.В. 227, 231, 237, 239, 243
Осипов А.В. 81, 325
Осипов Е.В. 91
Остендорф А. 139

-П-

Павельев В.С. 35
Павлов А.В. 181
Павлов В.И. 111
Павлов И.Н. 427, 431
Павлов П.В. 481
Пагава Л.Л. 95
Палатников М.Н. 41, 45, 337
Панкратов А.Л. 393
Парфенов В.А. 329
Пастор А.А. 277
Патапович М.П. 289, 313, 319
Патрушев Б.А. 441
Пашкевич М.Э. 255
Пашковская И.Д. 319
Пен Е.Ф. 459
Перевощиков Д.А. 345
Перепелица А.С. 69
Перин А.С. 331
Перминов Н.С. 131
Петров В.М. 161
Петров Н.В. 471
Петров Н.И. 125, 379
Петрова Е.К. 183
Петрова О.Б. 349
Пикулев В.Б. 45
Пикуль О.Ю. 337

Пиляк Ф.С. 341
Пименов А.Ю. 187
Писаревский Ю.В. 341
Пискунов Д.Е. 193
Пичкурентко С.В. 279
Плеханов А.А. 141
Плёткин А.П. 165
Пожидаев Е.П. 33
Полетаев Д.А. 323, 437
Понетаева И.Г. 333
Попова И.О. 255
Преснов Д.Е. 217
Привалов В.Е. 281
Прокопенко Т.А. 319
Просовский О.Ф. 151
Просовский Ю.О. 151
Проходцов А.И. 385
Пугачев Д.Ю. 309
Пузановский К.В. 333, 343
Пустовойт В.И. 379
Путин А.Н. 195
Путилов А.Г. 99
Пучнина С.В. 309

-Р-

Радзиевская Т.А. 361
Разина А.Г. 221
Раков А.А. 167
Ракович Ю.П. 59
Расковская И.Л. 311
Рассолов Е.А. 421
Рахматуллина А.Р. 353
Решетников Д.Д. 123
Рогалин В.Е. 79, 297
Рогашевский А.А. 299
Рогожников Г.С. 321
Родин В.Г. 485, 487
Рожкова К.С. 219
Ромашко Р.В. 173, 429
Ростенко Д.С. 165
Рощина Н.В. 315
Рудакова Н.В. 247
Рудая Л.И. 199
Ружицкая Д.Д. 369
Рулев О.А. 295
Русинов А.П. 249
Рушнова И.И. 31
Рыжикова Ю.В. 369
Рымов Д.А. 479

Рябинин А.В. 175
Рябухо В.П. 441
Рябушкин О.А. 49
Рябцев И.И. 277
Рябцев И.П. 469

-С-

Савельев Е.А. 147
Савельев М.В. 137
Савинов С.А. 101
Савченков Е.Н. 47
Сагитова А.М. 101, 115
Саечников А.В. 139
Саечников В.А. 139, 475
Сазонов С.В. 119, 125
Салахов М.Х. 235
Самохвалов А.А. 307
Самохвалов П.С. 59
Самусев А.К. 129
Самусев И.Г. 251, 311
Сапарина С.В. 71
Сарафанникова А.В. 371
Саттарова А.И. 301
Сахаров М.В. 303
Свиридов А.А. 473
Севостьянов О.Г. 335
Седова Ю.К. 285
Сейсембекова Т.Е. 219
Селюков А.С. 237, 239, 243
Семенцов Д.И. 391
Сергеев М.М. 293
Сердобинцев П.Ю. 277
Сердюков В.В. 367
Сидоров Г.Ю. 215
Сидоров Н.В. 41, 45, 337
Синицын Д.В. 101, 115, 295
Скоркин В.М. 273
Смирнов А.П. 201
Смирнов В.В. 305
Смирнов М.В. 45
Смирнов М.С. 69
Смирнов Н.А. 39
Соколенко Б.В. 323, 439, 471
Соколов П.П. 191
Соколова Д.А. 227, 231, 237, 239, 243
Соколова И.М. 199
Соколовский Г.С. 31
Соснова Н.С. 329
Сосунов А.В. 43

Средин В.Г. 303
Старииков Р.С. 159, 183, 409,
417, 479, 487

Старков А.С. 351, 355
Стебунов Ю.В. 77
Степанов И.А. 89, 93
Степанова О.С. 315
Стирманов Ю.С. 49
Стороженко Д.В. 173
Стрелецкий О.А. 213
Строганова Е.В. 333, 339, 343
Струк В.К. 145
Судас Д.П. 147
Суетин Н.В. 425
Сысоев И.А. 241
Сыч Д.В. 385
Сычев В.В. 213
Сычугин С.А. 51

-Т-

Тайдаков И.В. 245
Тараканов В.П. 85
Тарасов С.А. 361
Теплякова Н.А. 41, 337
Тимофеев И.В. 247, 259
Титов Р.А. 41
Титова А.В. 313
Титовец П.А. 171, 301
Ткаченко Т.П. 33
Ткачук А.П. 91, 325
Толстик А.Л. 31
Третьяков С.А. 57
Тропин А.Н. 365
Тряпицын В.Л. 411
Тумачек А.С. 105
Тынышова Т.Д. 445
Тюленев А.С. 357

-У-

Ус Н.А. 405
Устинов Н.В. 125

-Ф-

Фазалова Э.К. 199
Федоров В.А. 335
Федоров Д.Л. 203
Филатов В.В. 279
Филин С.А. 79, 297
Фридкин В.М. 341

Фрорип А. 315

-Х-

Халяпин В.А. 377
Ханкаев А.А. 251
Харинцев С.С. 71, 75, 235
Харитонов А.В. 235
Хатыров Н.П. 111, 167, 399, 407
Хобта Р.Г. 481
Хомич Ю.В. 79, 297
Хомченко А.В. 363, 453
Холёрский А.Н. 271, 275
Храмов Н.А. 387
Хубнер У. 143
Худайбергенов Т.А. 37
Хусяинов Д.И. 117
Хыдырова С. 89, 93, 265

-Ц-

Цветков М.В. 427
Цейсбергер М. 143
Циплакова Е.Г. 471

-Ч-

Чалдышев В.В. 61
Чевицелова Т.А. 69
Червяков А.В. 63
Черёмхин П.А. 409, 417, 477, 479, 485, 487
Черных Е.А. 75
Чернявская Э.А. 139
Чигирев Д.А. 199
Чижиков А.И. 55
Чинь Н.Х. 291
Чиркова И.М. 335
Чистяков А.А. 87, 91, 141, 325
Чмерева Т.М. 253
Чубич Д.А. 153
Чувакова М.А. 35
Чувызаалов А.А. 145
Чурсин Н.А. 453

-Ш-

Шабанов В.Ф. 259
Шадрин Е.Б. 255
Шамрай А.В. 161
Шандаров С.М. 47, 53, 347
Шаховой Р.А. 105
Шелковой В.Е. 343
Шепелев А.Е. 107

Шитц Д.В. 189
Шифрина А.В. 467, 469
Шишканов О.Н. 67
Шишова М.В. 197
Шкуратова В.А. 293
Шмаков С.С. 53, 449
Шмаргилов С.А. 339
Шмидт М.А. 143
Шнайдевинд Х. 143
Шостка Н.В. 437
Штек С.Г. 419, 423
Штоколов А.А. 413
Шулейко Д.В. 217
Шур В.Я. 35, 47

-Щ-

Щербатенко М.Л. 385
Щукин А.В. 331

-Э-

Элсайед М.А. 205

-Ю-

Юсупов В.И. 27, 83
Юшков К.Б. 55, 177

-Я-

Яковенко Н.А. 67, 367, 395
Якубовский Д.И. 77
Якунина М.И. 261
Якущева Г.Г. 147
Ямщиков В.А. 79, 297
Яновский А.В. 484
Ярмак П.А. 339