



Д. С. Рождественский.
Основатель и первый директор
Государственного оптического института (1918),
организатор Русского оптического общества (1922)

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С. И. ВАВИЛОВА»

ПРИКЛАДНАЯ ОПТИКА 2024

Сборник тезисов
XVI Международной научной конференции

Санкт-Петербург
17–18 декабря 2024 г.

СКИФИЯ-ПРИНТ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 2025
ISBN 978-5-00197-189-4

УДК 535
ББК 22.34
П75

Организаторы:

НПО ГОИ им. С. И. Вавилова, Санкт-Петербург
Оптическое общество им. Д. С. Рождественского (ООР), Санкт-Петербург
Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, Санкт-Петербург
АО «Швабе», Москва
НИИ ОЭП, г. Сосновый Бор, Ленинградская область
НПО ГИПО, г. Казань
ФГБОУ ВО ПГУТИ, г. Самара
ФГБОУ ВО СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург
АО «ЛОМО», Санкт-Петербург
Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург
ОАО «Белорусское оптико-механическое объединение», Беларусь

Рецензенты:

Архипова Л. Н. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Шашкин А. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Дымишиц О. С. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Арбузов В. И. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Тер-Нерсисянц Е. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Горемыкин Ю. А. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Каманина Н. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Белоусова И. М. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),
Леонов М. Б. (Филиал АО «Корпорация “Комета”» —
«Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения»),
Шелепин Ю. Е. (Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН).

(15 Мб) **Прикладная оптика — 2024:** сборник тезисов XVI Международной научной конференции (17–18 декабря 2024 г., С.-Петербург). — СПб.: Изд-во Скифия-принт, 2025.

Сборник содержит тезисы докладов участников XVI Международной научной конференции «Прикладная оптика — 2024», состоявшейся в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова 17–18 декабря 2024 г. В тезисах представлены результаты исследований и современные тенденции развития оптического материаловедения и приборостроения, сгруппированные по восьми основным направлениям работы конференции.

Подписано к использованию 08.08.2025
ООО «Издательство Скифия-принт».
197198, Санкт-Петербург, ул. Большая Пушкарская, д.10.
Тел./факс +7(812) 982-83-94
E-mail: skifia-print@mail.ru
www.skifia-print.ru

Председатель программного комитета:

Полищук Г. С. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова)

Сопредседатели программного комитета:

Дукельский К. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),

Архипова Л. Н. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова),

Розанов Н. Н. (ФТИ им. А. Ф. Иоффе)

Ученый секретарь: Храмова Т. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова)

Программный комитет:

Председатель *Полищук Г. С. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова)*, сопредседатели: *Дукельский К. В. (АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»), Розанов Н. Н. (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Архипова Л. Н. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова); Автайкин Д. А. (РФЯЦ — ВНИИЭФ), Демидов В. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Александров Е. Б. (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Алексеев В. А. (ИЖГТУ), Арбузов В. И. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Бабин С. А. (ИАиЭ СО РАН), Багдасаров А. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Балоев В. А. (АО «Швабе»), Бахолдин А. В. (Университет ИТМО), Барышников Н. В. (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Белоусова И. М. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Бурдин А. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова, СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ПГУТИ), Венедиктов В. Ю. (СПбГЭТУ ЛЭТИ), Владыко А. Г. (СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича), Гаранин С. Г. (ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ), Грейсхух Г. И. (ПГУАС), Демидов В. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Евстропьев С. К. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова, СПбГТИ (ТУ), Университет ИТМО), Иванов В. П. (НПО ГИПО), Закутаев А. А. (ВК им. А. Ф. Можайского), Казанский Н. Л. (Самарский университет), Каманина Н. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Козлов С. А. (Университет ИТМО), Коняхин И. А. (Университет ИТМО), Коротаев В. В. (Университет ИТМО), Кошелев А. В. (УОМЗ), Миллер В. Т. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Михайлов М. Д. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова, СПбПУ), Модель С. С. (КМЗ), Морозов О. Г. (КНИТУ-КАИ), Мыльников А. Ф. (ЗОМЗ), Никоноров Н. В. (Университет ИТМО), Павлов Н. И. (НИИ ОЭП), Парпин М. А. (Корпорация «КОМЕТА»), Попов С. В. («Швабе»), Семенов С. Л. (НЦВО им. Е. М. Дианова при ИОФ им. А. М. Прохорова РАН), Сенник Б. Н. («Швабе»), Султанов А. Х. (УГАТУ), Сычев М. М. (СПбГТИ (ТУ)), Тер-Нерсисянц Е. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Цыцулин А. К. (НИИ телевидения), Чижев Ю. В. (СПбГУ), Шамрай А. В. (ФТИ им. А. Ф. Иоффе), Шашкин А. В. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова), Шевцов С. Е. (НИИ ЭОП), Шелепин Ю. Е. (Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН), Ширанков А. Ф. (МГТУ им. Н. Э. Баумана), Яковлев В. А. (НПО ГОИ им. С. И. Вавилова)*

Секции конференции:

1. Вычислительная оптика, оптические системы и голография.
2. Оптические материалы и технологии.
3. Волоконная оптика.
4. Оптико-электронные приборы.
5. Метрология и стенды.
6. Нано- и биотехнологии в оптике.
7. Лазерная техника.
8. Нейроиконика (форма и цвет).

Редакторы:

Архипова Л. Н.

Демидов В. В.

Пашин С. С.

Храмова Т. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ГОЛОГРАФИЯ

<i>Я. В. Терло, А. В. Бахолдин, А. О. Вознесенская</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ.....	15
<i>А. М. Безуглый, А. В. Бахолдин</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИЕМНОГО МОДУЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА С ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕПЛОСКОЙ ФОРМЫ.....	17
<i>С. Н. Бездидько, Е. И. Морозова</i> ПОСТРОЕНИЕ (СИНТЕЗ) СТАРТОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МИНИМАЛЬНЫМИ УГЛАМИ ПАДЕНИЯ ЛУЧЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ.....	18
<i>С. Н. Бездидько</i> РОЛЬ ТЕОРИИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ АБЕРРАЦИЙ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	19
<i>Ю. В. Бажанов, А. М. Степанцов</i> ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ СО СФЕРИЧЕСКИМ ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ	20
<i>М. В. Агринский, Д. Г. Откупман</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕЙКОСАПИРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	22
<i>О. Н. Балащенко, Л. Н. Архипова</i> ВАРИАНТЫ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ.....	23
<i>Р. И. Куц, В. П. Корольков, Д. А. Белоусов, А. Р. Саметов, А. И. Малышев</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР В КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРУЕМЫХ ГОЛОГРАММАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	25
<i>А. А. Сырбаков, И. А. Зарубин</i> РАЗРАБОТКА ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА С ЗЕРКАЛАМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ.....	26
<i>А. С. Бочкова</i> КОМПЛЕКСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАНКРАТИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	29
<i>А. П. Семенов, М. А. Абдулкадыров, А. Д. Тамбовский, В. Е. Патрикеев</i> КОНТРОЛЬ И ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ВНЕОСЕВОЙ ОПТИКИ.....	31
<i>Г. И. Грейсх, И. А. Левин</i> КОАКСИАЛЬНО-ЛАМИНИРОВАННЫЕ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ	33
<i>А. А. Невоструев, М. Р. Зарипов, И. Е. Гусаров, А. И. Калугин</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЗОВОГО РАСТРА В СОСТАВЕ ПРИЕМНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	34
<i>И. А. Боголюбов, Ю. В. Бажанов, В. Н. Мокшанов</i> ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КРУПНОГАБАРИТНОГО ИК-РАДИОМЕТРА С ДЕЛЕНИЕМ ПОЛЯ МЕЖДУ КАНАЛАМИ.....	35
<i>С. Н. Гуляев, Н. М. Ганжерли, И. А. Маурер, Д. А. Ильюшина</i> РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ, ЗАПИСАННЫЕ ВО ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ.....	37
<i>А. В. Бахолдин, А. В. Уварова</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ШИРОКОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК НАБОРА ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ.....	39
<i>Е. А. Буракова, А. В. Бахолдин</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК ПОДБОРА ИНТРАОКУЛЯРНОЙ ЛИНЗЫ ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	40

<i>П. А. Кравцов, Д. А. Титов, В. А. Рыжова</i> АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ СКАНИРОВАНИЯ С БЕСПИЛОТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ.....	41
<i>П. А. Мединников, Н. И. Павлов</i> РАСЧЕТ ОБЛУЧЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЗЕМЛИ.....	43
<i>Д. Б. Никитин, В. А. Русов</i> РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ ИЗ НЕДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	45
<i>Д. Б. Никитин, В. А. Русов</i> РАЗРАБОТКА МАКЕТА СЕГМЕНТИРОВАННОГО БЕРИЛЛИЕВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ПРОЕКТА ОРБИТАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ.....	47
<i>А. В. Григорьев, А. Е. Прокофьев</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАВЕДЕНИЯ	49

Секция 2. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<i>В. И. Арбузов</i> ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЛАБЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СТЕКЛАМИ	51
<i>Е. Ю. Кабыкина, А. Е. Львов, И. В. Южаков, П. В. Пестерева, Л. В. Жукова</i> ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ	53
<i>П. В. Пестерева, Д. Д. Салимгареев, А. Е. Львов, А. А. Южакова, Л. В. Жукова</i> ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА	54
<i>Н. Д. Кундикова, Э. А. Бибилова, А. В. Кабанов</i> МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД, ОСНОВАННЫЙ НА ОБОБЩЕННОЙ ТЕОРЕМЕ ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ.....	55
<i>С. К. Евстропьев, В. М. Волынкин, Д. В. Булыга, В. А. Островский, К. Н. Макаров, К. В. Дукельский, Г. С. Полищук</i> ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА.....	56
<i>А. Г. Березовский, Н. А. Добычин, С. М. Дубровских, М. Н. Ивин, А. Н. Качемцев, А. А. Коновалов, Т. В. Котерева, А. С. Кустов, И. В. Скрипачев, Е. М. Чурбанов</i> ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЛЬФИДА И СЕЛЕНИДА МЫШЬЯКА	57
<i>Л. Л. Хомутинникова, И. К. Мешковский, И. В. Москаленко, Е. В. Скорб, И. В. Багров, С. К. Евстропьев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЭПР И ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ФОТОГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА КОМПОЗИТАМИ СИСТЕМЫ $ZnO-SnO_2-Fe_2O_3$	58
<i>М. А. Швиндин, Е. В. Зеленина, В. В. Бахметьев</i> ВЛИЯНИЕ СВЧ-ОБРАБОТКИ НА ВРЕМЯ СИНТЕЗА И РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИНКСУЛЬФИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ.....	60
<i>Р. И. Анисимов, А. А. Колмаков, Э. Комов, С. М. Шандаров</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ	61
<i>В. В. Бахметьев, Г. Ф. Янг</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ФТОРИДА ЛАНТАНА КАК ЛЮМИНОФОРА ДЛЯ РЕНТГЕНОФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ	62
<i>Е. В. Зеленина, А. В. Чуркина, И. В. Снятков, М. М. Сычев</i> ИЗУЧЕНИЕ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ЭФФЕКТА ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЕ ЦИНКОСУЛЬФИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ	64
<i>В. А. Картошкин, А. И. Окуневич</i> СДВИГ ЧАСТОТЫ ЛИНИИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ	65

<i>В. А. Картошкин</i>	
СДВИГИ ЧАСТОТЫ ЛИНИИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЩЕЛОЧНЫХ АТОМОВ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ	66
<i>М. Э. Самигуллин, М. Д. Михайлов, А. В. Белых, М. А. Ременный</i>	
ЛЕТУЧЕСТЬ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СПЛАВОВ	67
<i>А. А. Дунаев, В. Н. Егоров, А. А. Луковникова, Е. К. Прокопьева, Е. Ю. Токарева</i>	
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ИЗ ФТОРИСТОГО МАГНИЯ	69
<i>А. А. Онущенко, И. Д. Авдеев</i>	
СТЕКЛА С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОНИКИ	71
<i>С. С. Мальцев, О. С. Дымшиц, И. П. Алексеева, С. С. Запалова, А. А. Жилин</i>	
ВЛИЯНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ	73
<i>М. П. Шепилов</i>	
О НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПОКАЗАТЕЛЯ РАССЕЯНИЯ СТЕКЛОКЕРАМИК	74
<i>А. А. Якиманский, Т. Г. Чулкова, Д. А. Лыпенко, А. В. Якиманский</i>	
СОПОЛИМЕРЫ ФЛУОРЕНА И ДИКАРБОНИТРИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ СТИЛЬБЕНА И ФЕНАНТРЕНА — МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ДИОДОВ И ФОТОДИОДОВ	75
<i>А. А. Леонидова, М. Д. Басманов, Н. В. Никоноров</i>	
ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СВИНЦОВО-СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МЕТОДОМ ЛИЭС	76
<i>М. М. Сычев, А. А. Ерузин, П. А. Каташев, С. В. Мякин</i>	
УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ ПЛЕНОК WO ₃ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ УГЛА НАПЫЛЕНИЯ	78
<i>Н. Е. Штомпель, Е. В. Николаева, В. В. Томаев, С. В. Мякин, С. А. Зайцева</i>	
СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА	79
<i>П. Н. Ким, М. Н. Крахалев, Д. П. Федченко, Н. В. Рудакова, И. В. Тимофеев</i>	
ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЙ МОЗАИЧНЫЙ ФОТОННЫЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР НА ОСНОВЕ МАССИВА ПРИЗМ	80
<i>Р. К. Дойко, А. Ю. Иванова, П. Н. Ким, И. В. Тимофеев</i>	
СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ J-АГРЕГАТЫ	82
<i>М. Д. Назмутдинов, Д. А. Пермин, С. А. Мельников</i>	
ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СО СТРУКТУРОЙ ФТОРАПАТИТА МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ	84
<i>Т. С. Поздова, Д. А. Пермин, М. Д. Назмутдинов, М. С. Болдин, С. В. Курашкин, И. Л. Снетков, Т. Л. Барышников</i>	
ВИЗУАЛИЗАТОРЫ МОЩНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНТИСТОКСОВЫХ ЛЮМИНОФОРОВ (Y _{1-x-y} Yb _x Er _y) ₂ O ₃ —MgO	85
<i>Г. Кан, Ч. Цуй, А. Н. Терпицкий, С. А. Щербак, А. А. Липовский</i>	
ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В СТЕКЛЕ, СТРУКТУРИРОВАННОМ ЭЛЕКТРО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДИФфуЗИЕЙ	87
<i>А. Ю. Лунёв, Е. А. Михарев, А. И. Сидоров, П. А. Костин</i>	
ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНЕК И ДИСПЕРСНЫХ ВОЛН В МИКРОСФЕРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ	89
<i>П. Ш. Устабаев, В. С. Коваленко, З. А. Струченков, В. В. Бахметьев</i>	
РЕНТГЕНОЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ Gd ₂ O ₃ S, АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ	90
<i>П. Д. Зыкова, В. В. Бахметьев</i>	
СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОЛЮМИНОФОРА GdF ₃ : Tb	91
<i>М. А. Гирсова, Г. Ф. Головина, И. Н. Анфимова, Л. Н. Куриленко, Т. В. Антропова</i>	
СТЕКЛООБРАЗНЫЕ ВИСМУТСОДЕРЖАЩИЕ ФОТОЛЮМИНОФОРЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ Ag ⁺ ИЛИ Y ³⁺	93

<i>А. В. Балашов, А. Рамос Веласкес, А. Г. Бондаренко, Д. В. Канонов, Г. В. Романова</i> ОСАЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В МИКРОФЛЮИДНЫЕ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕАКЦИИ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ	94
<i>М. А. Гаврилова, Д. А. Гаврилова, С. К. Евстропьев</i> ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ СИСТЕМЫ ZnO—MgO, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ Cu И Mn	96
<i>П. В. Пестерева, А. Е. Львов, А. А. Южакова, Д. Д. Салимгареев, Л. В. Жукова</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ: ОТ СИНТЕЗА ШИХТЫ ДО ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ.....	97

Секция 3. ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

<i>И. Л. Ловчий</i> ОПТИМАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ SPUN СВЕТОВОДА ДЛЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА	99
<i>А. А. Князева, С. Р. Егиян, О. А. Клименко, З. Али, Л. В. Кулик, В. Н. Антонов</i> ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ	101
<i>А. В. Бурдин, А. Ю. Барашкин, А. С. Бородинов, М. В. Дашков, В. В. Демидов, К. В. Дукельский, А. С. Евтушенко, Е. С. Зайцева, Е. В. Тер-Нерсисянц</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ КВАРЦЕВЫХ КИРАЛЬНЫХ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ПРОФИЛЬ ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЛОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА	103
<i>А. В. Бурдин, А. А. Беяев, М. В. Дашков, В. В. Демидов, К. В. Дукельский, А. С. Евтушенко, Е. С. Зайцева, Т. В. Никулина, С. С. Пашин, Е. В. Тер-Нерсисянц</i> РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛАЗЕРА НА ВЫХОДЕ КОМБИНАЦИИ КВАРЦЕВОГО КИРАЛЬНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТОВОДА С ПОЛОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ И ГРАДИЕНТНОГО МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА 100/125.....	105
<i>С. Е. Барыкина, И. В. Южаков, Д. Д. Салимгареев, А. Е. Львов, Л. В. Жукова</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАДИАЦИОННОСТОЙКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ	107
<i>Д. В. Свистунов</i> ВЛИЯНИЕ СВЯЗИ МОД В ТРАКТОВОМ ВОЛОКНЕ ВОЛС ПРИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ.....	108
<i>К. А. Захаренков, А. Н. Сигаев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГА ВРМБ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ОТ ШИРИНЫ СПЕКТРА НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ SFP-МОДУЛЕЙ	110
<i>В. В. Савин, К. А. Коннов, И. Д. Казачкова, И. А. Веремеенко, А. Ю. Киреев, А. В. Волков, М. Ю. Плотников</i> РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГЕОФОНА.....	113
<i>С. В. Варжель, У. Р. Коробкова, М. В. Сковородкина, Ю. И. Яндыбаева</i> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ГИБКОГО ИНСТРУМЕНТА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЕГО В ПРОСТРАНСТВЕ.....	114
<i>Ю. И. Яндыбаева, В. А. Якимук, Д. В. Калязина, М. В. Сковородкина, С. В. Варжель</i> ПРИМЕНЕНИЕ КАСКАДА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО УЗКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА	115
<i>А. В. Васильев, С. А. Волковский, А. С. Алейник</i> МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ФАЗОВЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГАЛФЕНОЛА	116
<i>Е. В. Ильин, К. Г. Еланская, А. И. Сидоров</i> ДАТЧИК ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА.....	118
<i>Н. Чуев, К. Г. Еланская, А. И. Сидоров</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ 2D ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА	119
<i>А. Н. Назаров, К. Г. Еланская, А. И. Сидоров</i> ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ 2D ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ	121

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

<i>П. В. Петров, В. В. Сидоров</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА В РЕЖИМЕ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ.....	122
<i>П. А. Меденников, Н. И. Павлов</i> АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ТОЧЕЧНЫХ СЛАБОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ	124
<i>И. И. Казаков, С. А. Козлов</i> ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ-ПЕРО НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ	125
<i>В. В. Коротаев, Г. Н. Маркушин, М. А. Чехов, А. Н. Чиванов, В. А. Рыжова</i> ПОГРЕШНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ.....	127
<i>Р. А. Кабиев, А. И. Грибаев, Г. П. Мирошниченко, А. П. Малмакин, А. В. Васильев, Д. И. Егоров, И. К. Мешковский</i> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ЗАЗОРОВ В КОМПРЕССОРЕ ДВИГАТЕЛЯ	129
<i>Д. В. Калязина, И. М. Куцый, А. В. Васильев, С. В. Варжель</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММИРУЕМОГО МОТОРИЗОВАННОГО АТТЕНУАТОРА ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	130
<i>А. А. Пивоварова, Е. В. Куницына, И. А. Андреев, Г. Г. Коновалов, Э. В. Иванов, Н. Д. Ильинская, Ю. П. Яковлев</i> НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ.....	131
<i>К. Н. Белов, А. В. Коржов, Н. Д. Кундикова, П. В. Лонзингер, В. И. Сафонов, В. А. Сурин, М. А. Ческидова</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУРЬЕ-ОБРАЗОВ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ	133
<i>И. Л. Виноградова, Е. Ю. Головина, Я. М. Косцов</i> О ПРИМЕНЕНИИ ФУНКЦИИ ЧИРПА ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СИСТЕМ СВЯЗИ	135
<i>Г. В. Гасич, И. М. Зайцев, С. С. Орешечкин, С. В. Якубовский</i> ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МИКРОКЛАССА.....	138
<i>А. И. Салихов, А. А. Шаймухаметов</i> ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ	140
<i>А. М. Вьюнышев, Н. Н. Давлетшин, А. С. Чиркин</i> НЕКРИТИЧНАЯ ПО ГЛУБИНЕ РЕЗКОСТИ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА	141
<i>Н. Г. Кувшинов, А. В. Нужин, В. В. Пронин</i> ИМИТАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА ПРИ ПРОВЕРКЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТОРА.....	142
<i>В. А. Мейтин, М. П. Толпежников, В. Н. Мокшанов, М. В. Кузнецов, К. Е. Токарев</i> УСТРОЙСТВО КОЛЛИНЕАРНОГО ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ С АКТИВНЫМ УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ	143
<i>Д. А. Коннов, С. В. Варжель, К. А. Коннов, И. Д. Казачкова, В. В. Савин</i> ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО С ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТЬЮ МЕЖДУ ЗЕРКАЛАМИ РЕЗОНАТОРА	145
<i>Р. А. Куренков, Г. М. Галина, Е. В. Левин, М. М. Дегтерева, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов</i> РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО БЕЛОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОСВЕТКИ РАСТЕНИЙ	146
<i>А. Ахмад, Н. В. Никоноров</i> ОБЪЕМНЫЕ ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ СТЕКЛА ФТР: ВИХРЕВОЙ ПУЧОК.....	148

<i>В. А. Тупилов, В. М. Самков, Б. С. Бутин</i>	
АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МОРСКИХ И ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО НАВИГАЦИОННЫМ ОГНЯМ С ПОМОЩЬЮ ОЭС НА БПЛА.....	150
<i>А. Н. Тропин</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ИНФРАКРАСНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	152

Секция 5. МЕТРОЛОГИЯ И СТЕНДЫ

<i>Л. С. Родикова, В. В. Коротаев, А. Н. Тимофеев</i>	
ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕЛИЧИНЫ ХОРДЫ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН	153
<i>М. Б. Леонов</i>	
КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ	155
<i>М. Б. Леонов, Е. С. Терлецкий, Д. А. Серегин</i>	
ВЛИЯНИЕ ДИСТОРСИИ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ	156
<i>М. Б. Леонов, Д. В. Мякинин, Д. А. Серегин, Н. Ю. Грибова</i>	
АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ АСТИГМАТИЗМА ЛИНЗ В ОПРАВАХ ПО РАСФОКУСИРОВОЧНЫМ КРИВЫМ	157
<i>В. В. Коротаев, Г. Н. Маркушин, М. А. Чехов, М. М. Симановский, В. А. Рыжова</i>	
СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ	158
<i>Е. Н. Савкова</i>	
ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВАЛИДАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОВ КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	160
<i>М. М. Никитин, И. А. Коняхин</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМА ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО ОТ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГРАНЬЮ	162
<i>Е. В. Яковлев, В. И. Курт, А. В. Соловьев, А. В. Синюткин</i>	
ИМИТАТОРЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОНА	164
<i>Д. Ю. Васильев, В. И. Курт, Д. А. Егшин</i>	
УСТРОЙСТВА ИМИТАЦИИ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	166
<i>Д. А. Егшин, В. И. Курт, Д. Ю. Васильев</i>	
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ СПЕКТРОКОМПАРАТОР	168
<i>В. Н. Васильев, А. А. Гулько, К. В. Жданов, П. М. Линский, Н. В. Никитин, В. С. Сиразетдинов</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОАПЕРТУРНОЙ МОДЕЛИ ЧЕРНОГО ТЕЛА В СОСТАВЕ СТЕНДА ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ	170
<i>А. С. Бочкова, А. С. Гук</i>	
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СТЕНДОВОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ КОЛЛИМАТОРОВ С ТЕСТ-ОБЪЕКТАМИ ВИДА ЦЕЛЕЙ.....	172
<i>В. В. Карпов, М. Е. Козырев, А. В. Марущенко, В. И. Петренко, Е. В. Сусов</i>	
СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОПРИЕМНИКОВ С КОДОМ ГРЕЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	174
<i>И. Л. Ловчий</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКООРДИНАТНОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА С МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ И МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ МАРКОЙ.....	175
<i>В. Н. Васильев, Л. А. Васильева, И. С. Миронов, Д. Д. Шестаков</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА	177

<i>А. Г. Бельченко, Л. А. Глущенко, А. М. Гудкова, К. А. Иванов, О. А. Лебедев</i> РАЗРАБОТКА УЗЛА ОСВЕТИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПТОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОЛНЦЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ	179
<i>В. Н. Васильев, Л. А. Васильева, И. С. Миронов, К. А. Томеев</i> СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТИ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА	180
<i>В. В. Азарова</i> МНОГОСЛОЙНЫЕ ОКСИДНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВЫСОКО ОТРАЖАЮЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ СОЗДАНИЯ.....	182
<i>В. С. Костров, Н. Т. Шардаков, Л. В. Жукова</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОБРАЗЦОВ В ИК-ОБЛАСТИ	184
<i>Д. А. Воробьева, А. А. Южакова, Л. В. Жукова</i> КАЛИБРОВКА ВОЛОКОННОГО ПИРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ.....	186

Секция 6. НАНО- И БИОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ

<i>В. В. Беляев, Т. Ф. Камалов, А. С. Соломатин, Ю. Т. Камалов, М. П. Петрушинин, А. Д. Латипов, А. А. Пасынков, А. А. Беляев</i> ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	188
<i>А. С. Тойкка, М. Г. Воробьев, Н. В. Каманина</i> ГРАНИЦА РАЗДЕЛА ИТО — ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ.....	190
<i>А. С. Терехова, С. В. Смирнов</i> ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМЕТРОВЫХ ПЛЕНОК ИТО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИХ ОТЖИГА	191
<i>Н. Д. Шарпарь, Н. Н. Рожкова</i> ГРАФЕНОВЫЙ УГЛЕРОД КАК СТАБИЛИЗАТОР НАНОЧАСТИЦ КВАРЦА	193
<i>М. Е. Ильин, А. С. Тойкка, М. Г. Воробьев, Н. В. Каманина</i> ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК СТАНДАРТНОГО И ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА	195
<i>Ю. Е. Исаев, А. С. Тарасов, А. Э. Дегтерев, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИРАСТВОРИТЕЛЯ, ЙОДОВОДОРОДНОЙ И СОЛЯНОЙ КИСЛОТ НА ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ПЕРОВСКИТА CsPbI ₃	196
<i>Ю. О. Волков, Б. С. Роцин, А. Д. Нурдин, Б. И. Островский, В. Е. Асадчиков</i> СТРУКТУРА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В СИСТЕМЕ ИТО-ПОЛИМЕР И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК.....	197
<i>В. С. Макин, Р. С. Макин</i> СВЯЗАННЫЕ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ РЕШЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	199
<i>В. С. Макин, Р. С. Макин</i> МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЕШЕТОК АНОМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ДИЭЛЕКТРИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ	200
<i>С. В. Лихоманова, Н. В. Каманина</i> ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЙОДНО-ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ПОЛЯРИЗАТОРОВ	202
<i>Л. О. Федорова, П. В. Кужаков, Н. В. Каманина</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ ШУНГИТА: ЭКСПЕРИМЕНТЫ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	204
<i>Г. Н. Зверева, И. Ю. Кирцидели</i> ОСОБЕННОСТИ ГОРМЕЗИСА МИКРООРГАНИЗМОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ	206

<i>Е. Н. Гусенников, С. И. Юран</i>	
ВЫБОР СПЕКТРА ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ В ФИТОТРОНЕ	207
<i>Н. С. Камалова, Т. Л. Майорова, Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова, В. И. Лисицын, С. В. Внукова</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ ИК-СПЕКТРОВ ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ГАУССА	208
<i>Д. М. Бельтюкова, В. П. Белик, К. А. Чудаков, О. В. Смирнов, И. В. Семенова, О. С. Васютинский</i>	
ВРЕМЯ-РАЗРЕШЕННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА И ТРИПЛЕТОВ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ХЛОРИНА Е6 В ПРИСУТСТВИИ АЛЬБУМИНА	210
<i>М. Н. Крахалев, А. С. Абдуллаев, А. С. Зуев, В. А. Гуняков, В. Я. Зырянов, И. В. Тимофеев</i>	
РЕЗОНАТОР ФАБРИ-ПЕРО С ФОТОУПРАВЛЯЕМЫМ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИМ ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ	212
<i>И. И. Андреев, О. А. Смолянская, С. В. Сирро</i>	
ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО И НАТУРАЛЬНОГО УЛЬТРАМАРИНА МЕТОДАМИ ИК И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	213
<i>О. А. Смолянская, И. И. Андреев, А. А. Баранова</i>	
ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПИГМЕНТОВ	214
<i>С. А. Корягин, Н. В. Каманина</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СИСТЕМЫ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ — НАНОТРУБКИ WS ₂ , ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ПРОЦЕСС ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ	216
<i>П. В. Долганов, Н. А. Спириденко, К. Д. Бакланова, В. К. Долганов</i>	
ФОТОННАЯ СТРУКТУРА С ДВУМЕРНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА	217
<i>А. А. Тягунов, Я. В. Барнаш, Н. В. Каманина</i>	
УПРАВЛЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ С МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПРИКЛАДЫВАЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ	219

Секция 7. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

<i>В. А. Русов, А. А. Мирзаева, М. В. Нежевясов, В. Э. Якобсон, С. Б. Еронько</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛАХ RTP Z-РОСТА	221
<i>В. В. Кабанов, А. О. Негриенко</i>	
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ	223
<i>Я. Р. Шубин, А. А. Белокур, А. Г. Раздобарин, И. В. Алексеенко, Е. В. Шубина, Л. А. Снугирев, Д. И. Елец, О. С. Медведев</i>	
ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНЫХ ДИАГНОСТИК МОНИТОРИНГА ЭРОЗИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАК РЕАКТОРОВ	225
<i>В. А. Алексеев, М. Р. Зарипов, С. И. Юран, В. П. Усольцев</i>	
МОДУЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УВЕЛИЧЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ	226
<i>В. С. Макин, Р. С. Макин</i>	
НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СКРИМИОНОВ	227
<i>И. Е. Гусаров, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Ю. Альес</i>	
МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА	229
<i>Д. Н. Кочурова, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Ю. Альес</i>	
ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	231
<i>К. Н. Горбаченя, Е. А. Волкова, В. В. Мальцев, В. Э. Кисель</i>	
КРИСТАЛЛ Er,Yb: GdMgB ₅ O ₁₀ КАК АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В ОБЛАСТИ 1,5–1,6 МКМ	233

<i>Н. Д. Кундикова, Э. А. Бибилова, И. Д. Ивченко</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ И ЗНАКА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЗАРЯДА СФОКУСИРОВАННОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА.....	235
<i>В. Н. Иванов, А. А. Онущенко, С. С. Запалова, Т. В. Зотова, С. И. Никитина, А. Н. Титов, А. В. Шашкин</i>	
ЭФФЕКТИВНЫЙ ПАССИВНЫЙ МОДУЛЯТОР ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРОВ С РАБОЧЕЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ 2 МКМ	237
<i>В. С. Макин, Р. С. Макин</i>	
МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УКИ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ	239
<i>А. А. Антонов, И. М. Белоусова, А. П. Жевлаков, А. С. Наривончик</i>	
ОПТИЧЕСКИЙ АТТЕНУАТОР VO2 ДЛЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	241

Секция 8. НЕЙРОИКОНИКА (ФОРМА И ЦВЕТ)

<i>В. М. Бондарко</i>	
СВЯЗЬ ОПТИКИ ГЛАЗА С РЕТИНОТОПИКОЙ И ОПТИЧЕСКИМИ ИЛЛЮЗИЯМИ	243
<i>В. М. Бондарко, С. Д. Солнушкин, В. Н. Чихман</i>	
ОПТИЧЕСКАЯ ИЛЛЮЗИЯ ЦОЛЬНЕРА ПРИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ	245
<i>К. Ф. Гласман, Е. Н. Гриненко</i>	
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В МЕДИАСИСТЕМАХ: ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ КАК СТИМУЛОВ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА.....	247
<i>К. Ф. Гласман, Е. Н. Гриненко</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕДИАСИСТЕМ	249
<i>И. Е. Гусаров, Д. Н. Кочурова, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Ю. Альес</i>	
МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	250
<i>А. Ю. Жданов, В. А. Рыжова</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ.....	251
<i>Д. А. Илюхин, В. О. Ячная, Р. О. Малашин, М. К. Ермаченкова, А. В. Волков, С. Г. Пашкевич, А. А. Денисов</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ БИНАРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ФАЗОВО-КОНТРАСТНЫХ СНИМКОВ КЛЕТОК НЕРВНОЙ ТКАНИ	252
<i>С. А. Коскин</i>	
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИСТАГМОГРАФИИ ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОЙ ВИЗОМЕТРИИ	254
<i>Р. О. Малашин</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБУЧЕНИЯ УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ КОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ	256
<i>В. Л. Смирнов, Л. Н. Архипова</i>	
ДИАПАЗОН ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА: СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ	258
<i>С. К. Стафеев, Д. Д. Шаров</i>	
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ МАКЛЕОДА — БОЙНТОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА.....	260
<i>Р. Д. Хлынов, В. А. Рыжова</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА И РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ — КОМПЬЮТЕР	261
<i>Е. Ю. Шелепин</i>	
АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЗОРА.....	262
<i>Д. В. Явна, В. В. Бабенко</i>	
ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЕМ ФУНКЦИИ МОДУЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТУРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ДАННОЙ ТОЧКЕ И ВЕРОЯТНОСТЬЮ ФИКСАЦИИ ВЗОРА НА НЕЙ.....	263

<i>В. О. Ячная, М. А. Михалькова</i>	
СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ 2D- И 3D-СНИМКОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ У ЧЕЛОВЕКА	265
<i>В. О. Ячная</i>	
АДАПТАЦИЯ ВИДЕОБАЗЫ LRS2 ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОВ ПО АРТИКУЛЯЦИИ	267
<i>Т. В. Брякилева</i>	
ОБЗОР ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДЕМАСКИРОВКЕ СЦЕН ОПЕРАТОРАМИ С НАРУШЕНИЯМИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ	269

Секция 1

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ОПТИКА, ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ГОЛОГРАФИЯ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ЛУЧЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА СИСТЕМЫ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Я. В. Терло, А. В. Бахолдин, А. О. Вознесенская

Университет ИТМО
e-mail: vespasian1999@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлен анализ применения модифицированного метода геометрического отображения лучей для расчета изображающих систем на примере системы дополненной реальности (AR).

Метод геометрического отображения лучей (МГОЛ) основывается на осуществлении трассировки лучей [1] через оптическую систему с последующим итерационным сопоставлением характеристик оптической системы для обеспечения соответствия выходного волнового фронта с требуемым [2]. Поведение каждого луча регулируется законами геометрической оптики, в частности, законом Снеллиуса.

За счет применения МГОЛ планируется уменьшить количество оптических элементов в канале формирования дополненного изображения до одного зеркала с поверхностью свободной формы (ЗПСФ). На рис. 1 представлена предлагаемая оптическая схема AR на базе ЗПСФ.

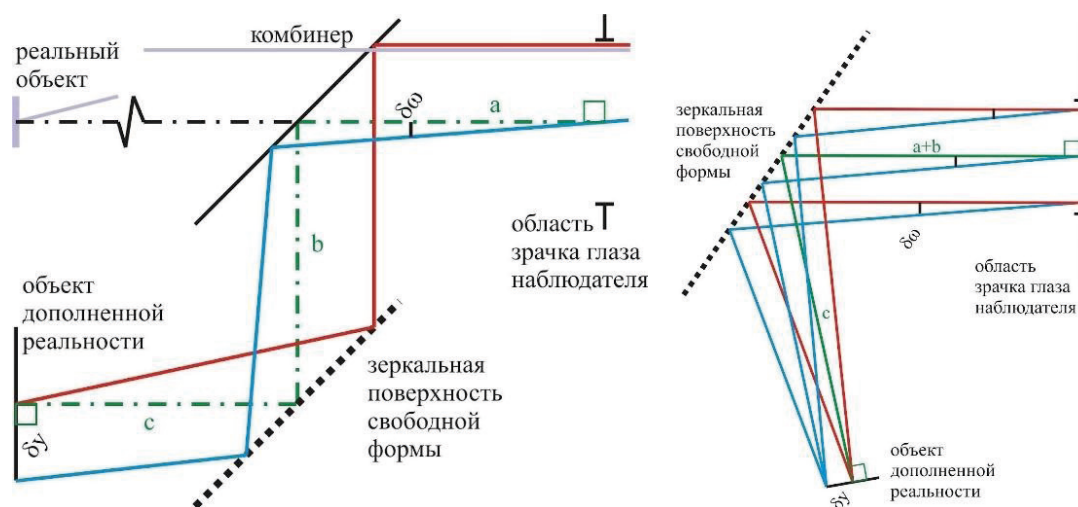


Рис. 1. Оптическая схема AR на базе ЗПСФ: слева — общий вид, справа — канал формирования дополненного изображения

Общий алгоритм расчета следующий: сначала трассируются апертурные и главные лучи для определения габаритов системы и ЗПСФ, затем для каждой пары координат на зрачке и на предмете определяются высота и угол входного (y и Y) и выходного (y' и Y') луча, после чего происходит трассировка этих лучей навстречу друг другу и исходя из принципа согласованности лучей определяются нормаль и касательная к ЗПСФ в точке пересечения лучей. При невозможности построения касательной (несоблюдение принципа сглаженности) к поверхности в точке без вырождения геометрической структуры ЗПСФ касательная приобретает ближайший возможный наклон к поверхности с целью минимизации остаточных аберраций.

Апробацией данного метода выступило моделирование системы в Zemax. Результирующие остаточные поперечные аберрации при корректировке их формой поверхности комбинера составили менее 1 мрад, что говорит о возможности использования МГОЛ для расчета изображающих систем с большим полем, однако для этого потребуются дополнительная проработка алгоритма и контроль аппроксимации поверхности на этапе моделирования.

Литература

1. *Nikolov D.K., Bauer A., Cheng F., Kato H., Vamivakas A.N., Rolland J.P.* Meta-formoptics: Bridging nanophotonics and freeform optics // *Science Advances*. 2021. Vol. 7. No. 18.
2. *Terlo Y.V., Voznesenskaya A.O.* Modeling of a focal pi-Shaper using the ray-mapping method // *J. Opt. Technol.* 2023. Vol. 90. P. 242–248.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИЕМНОГО МОДУЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА С ПРИЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НЕПЛОСКОЙ ФОРМЫ

А. М. Безуглый^{1,2}, А. В. Бахолдин¹

¹ Университет ИТМО

² АО «НПП “ЭЛАР”»

e-mail: ambezuglyi@itmo.ru

Аннотация. В данной работе представлен метод согласования основных частей приемного модуля оптико-электронного комплекса (ОЭК): объектива и криволинейной фоточувствительной поверхности приемника. Сформулированы критерии согласованности оптической системы (объектива) и приемной поверхности (ФПЗС или КМОП-приемника), связанные со сборкой, юстировкой и материальной базой системы. Описана связь между геометрическими параметрами приемника, которые применяют разработчики приемного модуля.

Для любого приемного модуля ОЭК согласование основных компонентов приемного модуля — объектива и фотоприемного устройства — является важнейшей операцией при сборке и юстировке. Для фотографических объективов операция юстировки осуществляется с целью получения требуемого качества изображения по всему полю зрения. Для этого приемная поверхность фотоприемника (ФПЗС или КМОП-приемник) устанавливается относительно плоскости наилучшего изображения. Однако при выполнении сборочных операций неизбежны линейные и угловые перемещения приемника относительно объектива вдоль оптической оси. Для корректировки возможных отклонений от заданного положения приемника проектировщику оптической системы следует учитывать все возможные варианты расположения приемника и подобрать эффективные средства компенсации перемещений.

При проектировании объектива и неплоской фоточувствительной поверхности приемника требуется учитывать ряд критериев, связанных со сборкой и юстировкой приемного модуля:

1. Глубина резкости объектива;
2. Линейные смещения приемника изображения по трем осям;
3. Наклон фотоприемника относительно оптической оси. Существует предельный угол наклона, при котором сохраняется требуемое качество изображения [1];
4. Кривизна поля изображения;
5. Коэффициент температурного расширения (КТР).

Литература

1. Строилов Н. А., Белинская Е. В., Брысин Н. Н., Василейская А. Н., Воронков С. В., Никитин А. В., Фокин А. А. Критерии и методы фокусировки высокоточных оптических измерительных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 119–130.

ПОСТРОЕНИЕ (СИНТЕЗ) СТАРТОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С МИНИМАЛЬНЫМИ УГЛАМИ ПАДЕНИЯ ЛУЧЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ

С. Н. Бездидько, Е. И. Морозова

Московский государственный университет геодезии и картографии
e-mail: sbezdidko@mail.ru

Аннотация. В данном докладе рассматривается работа по разработке реальных методов по построению стартовых оптических систем. На основании анализа существующих программных комплексов проектирования оптических систем выявлен и рассмотрен способ, включающий в себя следующий подход: оптическая система должна состоять из поверхностей, углы падения лучей на которые минимальны. Использование указанного принципа минимальности углов падения лучей позволило разработать эффективную методику построения стартовых оптических систем.

Анализ существующих программных комплексов проектирования оптических систем показывает, что в российских и зарубежных комплексах отсутствует этап синтеза, то есть этап, при помощи которого на основе требований технического задания (ТЗ) производится вычисление конструктивных параметров (построение) оптической системы, обладающей необходимыми коррекционными возможностями и являющейся хорошим предварительным решением для дальнейшей оптимизации. Предполагается, что исходная (стартовая) оптическая система уже существует, или разработчик выбирает ее из баз данных, содержащих ранее разработанные системы, или каким-либо способом создает ее самостоятельно. Поэтому одним из важнейших направлений работ в настоящее время является разработка реальных методов по построению стартовых оптических систем.

Как известно, аберрации, вносимые отдельными поверхностями, в значительной степени зависят от углов падения лучей на эти поверхности. Поэтому одним из простейших и эффективных способов построения стартовой оптической системы является следующий подход: оптическая система должна состоять из поверхностей, углы падения лучей на которые минимальны.

Использование указанного принципа минимальности углов падения лучей позволило разработать эффективную методику построения стартовых оптических систем. Особо следует отметить, что у синтезированных оптических систем уменьшены аберрации высших порядков из-за минимальности углов падения лучей на поверхности. Как известно, именно большая величина аберраций высших порядков является основной причиной появления затруднений при дальнейшей работе со стартовыми оптическими системами, а именно небольшие аберрации высших порядков определяют стартовую оптическую систему с улучшенными коррекционными возможностями.

РОЛЬ ТЕОРИИ ОРТОГОНАЛЬНЫХ АБЕРРАЦИЙ В ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. Н. Бездидько

Московский государственный университет геодезии и картографии
e-mail: sbezdidko@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрена теория ортогональных aberrаций, которая позволила решить целый ряд проблем, возникающих при проектировании оптических систем. В частности, основное внимание уделено построению эффективных методов aberrационного анализа и оптимизации оптических систем, основанных на определении независимого вклада aberrаций низших и высших порядков и их влияния на свойства и потенциальные возможности оптических систем.

Технический уровень разрабатываемых оптико-электронных изделий определяется, прежде всего, качеством используемых оптических систем, оптические характеристики которых определяют тактико-технические характеристики изделия в целом. Это обстоятельство определяет важнейшую роль оптиков-разработчиков в процессе создания новых оптических и оптико-электронных изделий.

Однако, несмотря на широкое развитие прикладной и вычислительной оптики, расчет новых оптических систем является в настоящее время во многом искусством разработчика, зависящим от его практического опыта и интуиции, а не точной инженерной дисциплиной, строго и однозначно алгоритмизирующей процесс проектирования.

Указанное обстоятельство во многом обуславливается недостаточным развитием теоретической базы оптики, которая должна обеспечить именно развитие методологии проектирования, нацеленной на содержательную формализацию всех этапов проектирования и обеспечивающей более полное понимание основных свойств оптических систем. Развита автором теория ортогональных aberrаций позволила решить целый ряд проблем, возникающих при проектировании оптических систем, и сделать весомый вклад в превращение искусства проектирования в науку проектирования, в том числе:

- сформировать методы определения вклада aberrаций различных порядков в ухудшение качества изображения;
- выявить ранее неизвестные фундаментальные свойства оптических систем, использование которых позволяет заметно повысить эффективность проектирования оптики;
- сформировать подходы по созданию нового поколения программ «псевдоглобальной» оптимизации с существенно уменьшенной локальной ограниченностью и т. п.

В представленном докладе основное внимание уделено построению эффективных методов aberrационного анализа и оптимизации оптических систем, основанных на определении независимого вклада aberrаций низших и высших порядков и их влияния на свойства и потенциальные возможности оптических систем. Разработанные методы позволили реализовать новые подходы к построению так называемых программ «псевдоглобальной» оптимизации оптических систем. При этом развиваемые в данной работе методы описания и анализа aberrационных свойств оптических систем доступно объясняют физические причины появления локальных минимумов в существующих программах оптимизации и пути их заметного сокращения.

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПОВ СО СФЕРИЧЕСКИМ ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Ю. В. Бажанов^{1, 2}, А. М. Степанцов^{1, 2}

¹ АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения»»

² Московский государственный университет геодезии и картографии
e-mail: bazhanovy@gmail.com

Аннотация. В работе представлен краткий обзор оптических схем крупногабаритных телескопов со сферическим главным зеркалом. Также представлены результаты расчета двух вариантов оптических схем телескопа проекта «Млечный путь». Обе схемы обеспечивают одинаковые значения входного зрачка, фокусного расстояния и входного поля, однако различны по конструктивным решениям, что влияет на их габаритные характеристики.

В рамках проекта «Млечный путь», целью которого является разработка системы обеспечения космической деятельности в околоземном пространстве, планируется создание крупногабаритного телескопа с диаметром главного зеркала $D = 1500$ мм, относительным отверстием $D:f' = 1:6$, полем зрения $2\omega = 0,42^\circ$. Проект предназначен для обнаружения техногенных космических объектов с блеском до 19–20^m. В состав телескопа должны быть включены адаптивная система и спектрометр.

Особый интерес представляет использование составных зеркал ввиду того, что суммарная масса этих сегментов будет намного меньше массы полноразмерного зеркала благодаря меньшей толщине отдельных сегментов. А изготовление составного сферического зеркала сводится к изготовлению одинаковых сферических зеркал небольшого размера.

Конфигурации апланатических систем со сферическим главным зеркалом и методы их расчета проанализированы в работах [1, 2], а также в значительном числе отечественных и зарубежных научных публикаций.

В недавней работе [3] представлены две оптические системы телескопа на основе сферического главного зеркала и плоского второго зеркала. Коррекция аберраций осуществляется посредством двухзеркального корректора, расположенного вблизи параксиального фокуса первичного зеркала. Для систем с $D:f' = 1:2$ и $D:f' = 1:4$ получены приемлемые результаты без использования асферики высших порядков. В представленных схемах в алгоритме расчетов предполагается равенство фокуса всей системы и параксиального фокуса главного сферического зеркала, что приводит к увеличенным продольным габаритам при заданном значении $D:f' = 1:6$. Ввиду этого нами предпринята попытка расчета оптических систем без этого ограничения.

На рис. 1 представлена схема с плоским вторым зеркалом и двухзеркальным корректором аберраций, корректор представляет собой асферические поверхности высшего порядка. Длина оптической системы — 3250 мм, а плоскость изображения вынесена за главное зеркало для дальнейшего оптимального пространственного размещения спектрометра и адаптивной системы. Центральное экранирование системы — 0,4. Фокусное расстояние системы — 9000 мм, диаметр главного зеркала — 1500 мм, угловое поле — $0,42^\circ$.

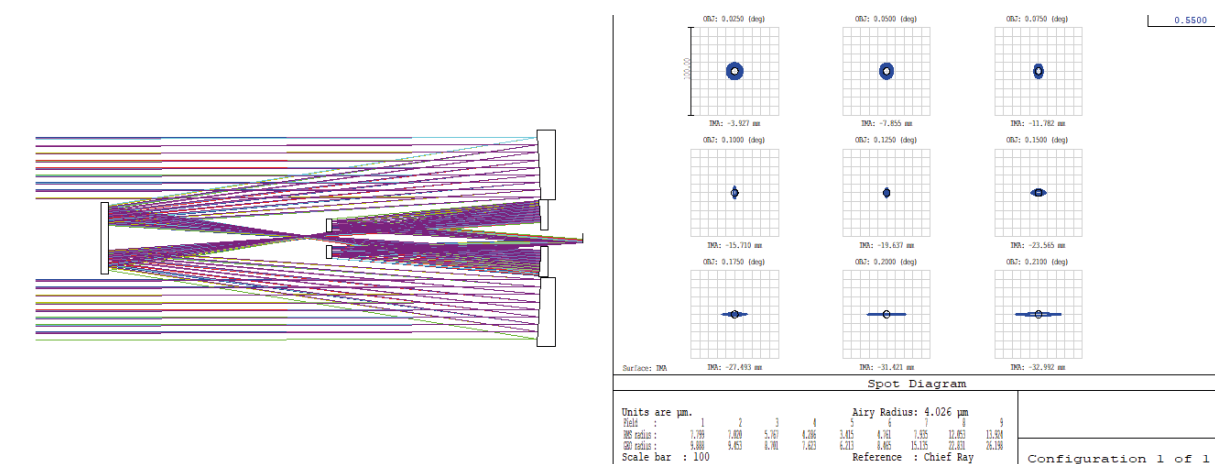


Рис. 1. Оптическая система телескопа со сферическим главным зеркалом и двухзеркальным корректором аббераций

На рис. 2 приведена схема с аналогичными характеристиками, однако в качестве корректора используется трехзеркальная система. За счет трехзеркального корректора можно получить качество изображения, близкое к дифракционному, при этом длина системы не превышает 2000 мм. Отсутствует необходимость во внешней бленде, достаточно наличия отсекающих между первым и последним зеркалом. При этом центральное экранирование системы — 0,33.

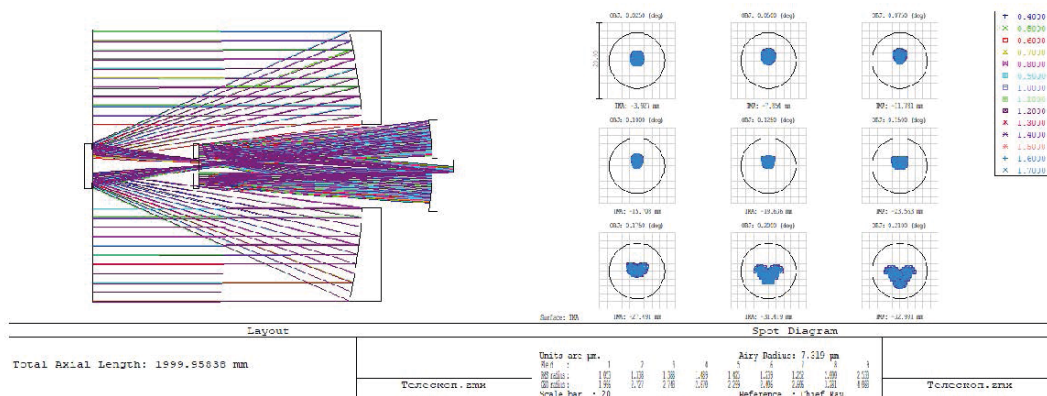


Рис. 2. Оптическая схема телескопа со сферическим главным зеркалом и трехзеркальным корректором аббераций

Результаты работы показывают возможность создания относительно недорогого телескопа для наблюдения космических объектов в видимой и инфракрасной области спектра, это позволит в дальнейшем создать сеть подобных телескопов для мониторинга техногенных космических объектов.

Литература

1. Puryayev D. T. Aplanatic four-mirror system for optical telescopes with a spherical primary mirror // Optical Engineering. 1998. No. 37(8). P. 2334.
2. Druzhin V. V., Puryayev D. T., Goncharov A. V. Optical system of aplanatic telescope with a 100 m spherical primary mirror // J. Astron. Telesc. Instrum. Syst. 2022. 30 June. No. 8(2). P. 024005.
3. Дружин В. В., Пуряев Д. Т. Оптическая система апланатического телескопа с главным сферическим зеркалом // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 60–72.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕЙКОСАПФИРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М. В. Агринский¹, Д. Г. Откупман²

¹ АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «АСТРОН»

² Московский государственный университет геодезии и картографии
e-mail: odvk@ya.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается исследование отражательной способности лейкосапфира, на основе которой произведен синтез двухспектральной зеркально-линзовой оптической системы.

Лейкосапфир (оптический монокристаллический сапфир, Al_2O_3) широко используется в оптической промышленности для изготовления плоскопараллельных пластин (окон), обтекателей, линз, призм, труб, стержней, неволоконных световодов и т. д. Популярность этого материала обусловлена широким диапазоном пропускания от УФ- до ИК-области спектра, высокой твердостью, химической устойчивостью и хорошими теплофизическими свойствами.

Исследования отражательной способности лейкосапфира [1] показали его достаточно высокую способность к отражению ИК-излучения (рис. 1).

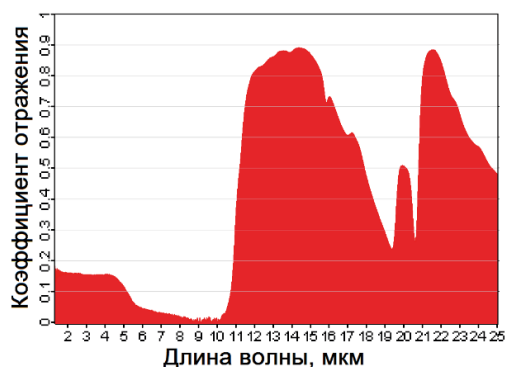


Рис. 1. Измеренная спектральная отражающая способность лейкосапфира в ИК-диапазоне

Исходя из этой особенности, в качестве примера была рассчитана двухспектральная зеркально-линзовая оптическая система (рис. 2) с фокусным расстоянием 100 мм для видимого диапазона, 125 мм для ИК-диапазона и угловым полем 6° .

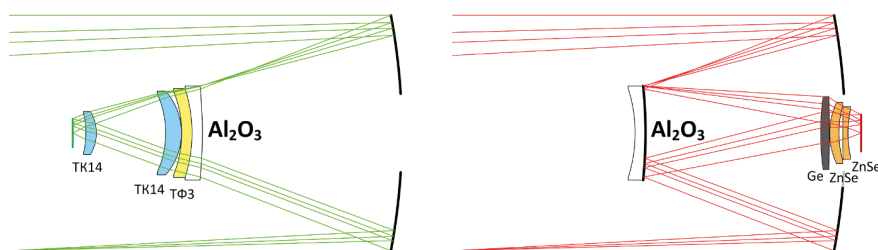


Рис. 2. Двухспектральная катадиоптрическая оптическая система в режимах работы для видимого (слева) и ИК (справа) диапазонов

Литература

1. Рогалин В. Е., Каплунов И. А., Ценина И. С., Андреева М. С., Филин С. А. Оптические свойства сапфира в области непрозрачности // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120. № 6. С. 952–955.

ВАРИАНТЫ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ЗЕРКАЛЬНЫХ И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ

О. Н. Балаценко¹, Л. Н. Архипова²

¹ ВКА им. А. Ф. Можайского

² АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»

e-mail: onbalatsenko@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены оптические схемы зеркальных, зеркально-линзовых объективов, разработанных за последние несколько лет в АО «ГОИ им. С. И. Вавилова», с диаметрами зрачков от 32 до 800 мм и угловыми полями от 17' до 6,2°. Объективы построены по двухзеркальным и четырехзеркальным схемам с линзовыми корректорами осевых и полевых aberrаций и без корректоров, которые реализованы в центрированном или пространственном вариантах. Приведены варианты оптических схем и их параметры.

Широкое применение в оптическом приборостроении находят зеркальные системы. Они позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении входной апертуры, а также обладают рядом других преимуществ. Однако центрированным зеркальным системам присущ и недостаток — центральное экранирование, которое приводит к уменьшению количества света в плоскости изображения, изменению распределения энергии в дифракционном пятне и увеличению рассеяния света, вызываемого дифракцией и сопровождаемого уменьшением контраста изображения [1, 2]. Пространственные (децентрированные) зеркальные системы лишены указанного недостатка. Однако данные системы сложны в изготовлении и юстировке, что существенно ограничивает их применение на сегодняшний день [3].

Рассмотрим основные тенденции разработок указанного направления на примере оптических систем, рассчитанных в последнее время в АО «ГОИ им. С. И. Вавилова».

При анализе имеющихся схемных решений можно выделить следующие группы зеркальных, зеркально-линзовых оптических систем:

- центрированные системы с корректором полевых aberrаций и без корректора. Это двухзеркальные системы, построенные по схемам Ричи — Кретьена, Кассегрена, Максудова, Корша [4, 5], как одноканальные, так и многоканальные. Угловые поля в них достигают 6,2° при фокусных расстояниях от 100 до 3300 мм и относительных отверстиях порядка 1:1–1:7. Коэффициент телеукорочения порядка 0,5–0,6. Центральное экранирование по площади не превышает 0,35. Качество изображения близко к дифракционному. При этом в большинстве схем использованы либо асферические зеркальные поверхности второго порядка, либо только сферические зеркала;
- пространственные системы на основе зеркального триплета Кука и четырехзеркальных схем, выполненных в том числе с использованием freeform-поверхностей, что дало возможность существенно повысить качество изображения. Угловые поля составляют порядка 2,5–3° при фокусных расстояниях от 600 до 3300 мм и относительных отверстиях 1:5–1:11. Центральное экранирование отсутствует. В схемах используются асферические поверхности как второго порядка, так и более высоких порядков.

Однако надо отметить, что при всех достоинствах пространственных систем, на сегодняшний день они сложны в реализации, в связи с чем используются более дешевые и простые традиционные зеркальные оптические системы.

Литература

1. *Михельсон Н. Н.* Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физматлит, 1995. 333 с.
2. *Сокольский М. Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1989. 221 с.
3. *Дружинин В. В., Пуряев Д. Т.* Оптическая система апланатического телескопа с главным сферическим зеркалом // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 4. С. 60–72.
4. *Савицкий А. М., Сокольский М. Н.* Оптические системы объективов для малых космических аппаратов // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 83–88.
5. *Бахолдин А. В., Бутылкина К. Д., Васильев В. Н., Романова Г. Э.* Разработка и исследование зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем для дистанционного зондирования Земли // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 11. С. 55–61.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И АМПЛИТУДНЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР В КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРУЕМЫХ ГОЛОГРАММАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Р. И. Куц, В. П. Корольков, Д. А. Белоусов, А. Р. Саметов, А. И. Малышев

ИАиЭ СО РАН
e-mail: korolkov@iae.nsk.su

Аннотация. В данной работе представлены результаты апробирования различных подходов в создании КСГ для задач серийного контроля асферических поверхностей. Приводятся практические результаты по изготовлению КСГ с использованием модернизированной установки круговой лазерной записывающей системы CLWS-300IAE и комбинирования различных типов дифракционных структур.

Для прецизионного контроля формы изготавливаемых асферических поверхностей широко используются компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ). В схемах контроля поверхности такие КСГ корректируют волновой фронт проходящего через них излучения. Чтобы КСГ, установленная в схему контроля, работала корректно, необходима тонкая настройка позиционирования каждого элемента схемы контроля.

Для точного выставления голограмм относительно выходного пучка интерферометра обязательно использовать амплитудные световозвращающие структуры в случае падения на КСГ сферического волнового фронта [1]. При использовании голограмм в коллимированном пучке для юстировки вокруг основной КСГ формируются фазовые фокусирующие структуры типа «кошачий глаз». Кроме того, рассмотрены конфигурации дополнительных дифракционных структур, упрощающих и ускоряющих процесс настройки схемы контроля при крупносерийных производствах. Такие структуры формируют контрольные метки в центре и на краях асферической поверхности. При этом снижаются требования к точности формирования волнового фронта и к дифракционной эффективности.

В докладе рассмотрены экспериментальные результаты по доработке изготовленных КСГ в нестандартных ситуациях. Например, увеличение эффективности амплитудной световозвращающей структуры, работающей в 3-м дифракционном порядке, возможно за счет перевода амплитудной структуры в вид фазовой отражающей бинарной структуры. В эксперименте эффективность такой структуры составила ~5 %. В случае использования амплитудных КСГ для контроля высокоотражающих асферических поверхностей в поле основной голограммы может возникнуть область яркого блика за счет отраженного дифрагированного излучения от основной голограммы, что существенно уменьшает рабочую область голограммы. Показано, что эту проблему можно решить, переведя основную голограмму в фазовый вид, тем самым снизив отражение от структуры и увеличив эффективность прошедшего дифрагированного излучения.

Литература

1. *Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Asfour J. M.* Computer generated holograms: fabrication and application for precision optical testing // Proc. SPIE. 2008. Vol. 7102. P. 710206.

РАЗРАБОТКА ЭШЕЛЛЕ-СПЕКТРОМЕТРА С ЗЕРКАЛАМИ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ

А. А. Сырбаков^{1, 2, 3}, И. А. Зарубин^{1, 2, 3}

¹ Новосибирский государственный технический университет

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН

³ ООО «ВМК-Оптоэлектроника»

e-mail: Aleksei.syrbakov@yandex.ru

Аннотация. В данной работе приведена разработанная модель эшелле-спектрометра с использованием зеркала свободной формы, полученная в ПО Zemax. Проведен анализ выходного изображения. Разработана программа на языке Python для расчета и отображения формы эшелле-граммы.

В настоящее время спектроскопия играет важную роль в различных сферах промышленности, обеспечивая прецизионный элементный анализ. Прогресс в этой области тесно связан с улучшением оптических параметров спектральных приборов. На данный момент по совокупности таких параметров, как ширина спектрального диапазона, светосила, спектральное разрешение, наложение дифракционных порядков, термостабильность и габариты, наилучшими выглядят спектрометры со скрещенной дисперсией. Их особенностью является использование эшелле-решетки, работающей в высоких порядках, поэтому такие приборы называют эшелле-спектрометрами. Современные спектрометры разных производителей [1–5] обладают схожими техническими параметрами, это позволяет сформировать требования при разработке отечественного эшелле-спектрометра: относительное отверстие — $f/6,7$; фокусное расстояние — 400 мм; рабочий спектральный диапазон — 164–780 нм; спектральное разрешение на 200 нм — не более 7 пм; размер детектора — 19×25 мм (размер фотоячеек переменный — 12,5 мкм или 25 мкм).

В результате моделирования [6] и расчета характеристик изображения, формируемого спектральным прибором, в ПО Zemax была разработана оптическая схема, представленная на рис. 1, обладающая спектральными характеристиками, приведенными в табл. 1.

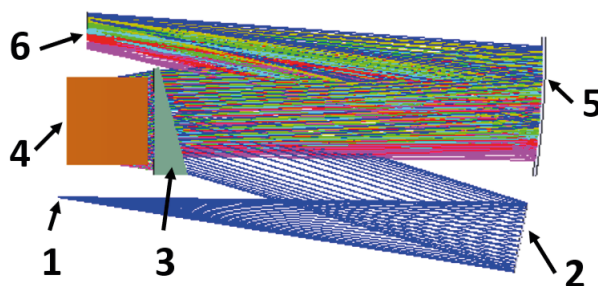


Рис. 1. Оптическая схема эшелле-спектрометра:

- 1 — щель 25×100 мкм; 2 — зеркало свободной формы; 3 — призма CaF₂;
4 — эшелле-решетка; 5 — сферическое зеркало; 6 — детектор

Таблица 1. Оптические характеристики разработанного спектрометра

Длина волны, нм	Порядок	Обратная линейная дисперсия, нм/мм	Спектральное разрешение в центре детектора, пм	Спектральное разрешение на краю детектора, пм
736	20	0,867	27,3	51,1
368	40	0,434	22,6	39,5
245	60	0,289	11,1	18,3
200	74	0,234	7,4	9,3
184	80	0,217	6,2	6,8
164	90	0,193	5,5	6,0

Также была разработана программа на языке Python для построения и визуализации формы детектора (эшеллеграммы), приведенной на рис. 2.

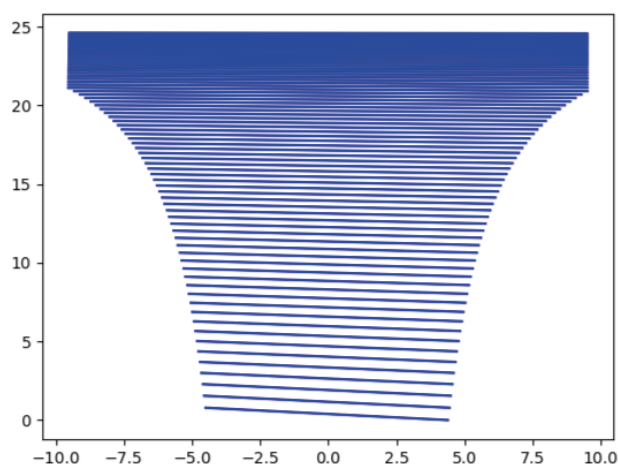


Рис. 2. Эшеллеграмма (область регистрации)

Таким образом, получены характеристики, которые соответствуют современным эшелле-спектрометрам. Разработанная схема спектрального прибора и программа расчета и визуализации эшеллеграммы, формируемой им, позволяет начать поиск элементной базы для создания опытного образца спектрометра.

Литература

1. Сайт фирмы PerkinElmer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.perkinelmer.com/product/avio-550-max-scott-cross-flow-system-n0810004> (дата обращения: 26.09.2024).
2. Сайт фирмы ThermoFisher [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/842320074141?SID=srch-srp-842320074141> (дата обращения: 26.09.2024).
3. Сайт фирмы Agilent [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agilent.com/en/product/atomic-spectroscopy/inductively-coupled-plasma-optical-emission-spectroscopy-icp-oes/icp-oes-instruments/5900-icp-oes-literature> (дата обращения: 26.09.2024).
4. Сайт фирмы Millab [Электронный ресурс]. URL: <https://analitika.millab.ru/catalog/analiticheskoe-oborudovanie/spektralnye-pribory/atomno-emissionnye-spektrometry/optiko-emissionnyy-spektrometr-s-induktivno-svyazannoy-plazmoy-expec-6500-svdv/> (дата обращения: 26.09.2024).

5. Сайт фирмы FPI [Электронный ресурс]. URL: https://www.fpi-inc.com/ru/product_cont_33611.html (дата обращения: 26.09.2024).
6. Бажанов Ю. В. и др. Гиперспектральные внеосевые системы с оптическими элементами свободной формы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 6. С. 735–741.

КОМПЛЕКСНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАНКРАТИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. С. Бочкова

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»
e-mail: a.bochkova@zenit-kmz.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрены различные подходы к проектированию линзовых оборачивающих систем и выбору оптимального закона движения оптических компонентов с учетом кинематики и динамики кулачковых механизмов. Исследование основано на известных работах по методологии проектирования оптических панкратических систем, по методологии проектирования кулачковых механизмов с циклоидальным и комбинированным законами движения, о применении такого типа систем при проектировании оптико-электронных приборов.

В современных панкратических системах используется классическая оптическая схема панкратической зрительной трубы с переменным фокусным расстоянием объекта или переменным увеличением оборачивающей системы. Особенности конструкции такого типа систем рассмотрены в статье [1].

В данном исследовании рассмотрены методологии проектирования оптических панкратических систем, предложенных И. А. Турыгиным [2] и И. И. Пахомовым [3], в которых математически не учитываются динамические и кинематические составляющие кулачковых механизмов для перемещения оптических компонентов. Исследование кинематики и динамики кулачковых механизмов оборачивающих систем показало, что все пары материалов могут быть использованы в данных механизмах, но не все законы движения компонентов будут удовлетворять закону движения компонентов и принципам проектирования панкратических систем.

По результатам проведения анализа законов движения оптических компонентов панкратических систем было предложено для выбора закона движения руководствоваться методологией проектирования кулачковых механизмов (Левитский [4], Литвин [5, 6], Решетов [7], Norton, Lyden [8]).

Проведенное исследование позволяет:

- провести модернизацию методики расчета линзовых оборачивающих систем (Киселев, Майков, Шимкович [9], Складаров, Полякова [10]), с учетом динамики и кинематики движения кулачкового механизма, для создания оригинальных оптических систем;
- оптимизировать трудозатраты при проектировании;
- разработать макетный образец, на котором была бы проведена проверка достоверности полученных результатов.

Литература

1. Васильева А. С., Филонов А. С. Линзовые оборачивающие системы зрительной трубы с переменным увеличением // Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». Сборник статей по итогам научно-технических конференций. 2019. Вып. 10. В 2 ч. Ч. I. С. 84–88.
2. Турыгин И. А. Прикладная оптика. Геометрическая оптика и методы расчета оптических схем. М.: Машиностроение, 1965. 362 с.
3. Пахомов И. И. Панкратические системы. М.: Машиностроение, 1976. 160 с.
4. Левитский Н. И. Кулачковые механизмы. М.: Машиностроение, 1964. 290 с.

5. Расчет и конструирование механизмов и деталей приборов / под ред. проф. Ф. Л. Литвина. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1975. 200 с. с ил.
6. Справочник конструктора точного приборостроения / под ред. Ф. Л. Литвина. М.; Л.: Машиностроение, 1964. 944 с.
7. Решетов Л. Н. Кулачковые механизмы. М.: Машгиз, 1948. 284 с.
8. Norton R. L., Lyden T. J. Cam Design and Manufacturing Handbook with Cdrom. New York: Industrial Press, Inc., USA, 2002. 610 p.
9. Патент № 2331035 Российская Федерация. Прицел с переменным увеличением / Киселев И. И., Майков Б. П., Шимкович Э. А. 10.08.2008. Бюл. № 22. 7 с.
10. Патент № 2779904 Российская Федерация. Оптический прицел с переменным увеличением / Скляров С. Н., Полякова Н. Т. 15.09.2022. Бюл. № 26. 11 с.

КОНТРОЛЬ И ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КРУПНОГАБАРИТНОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ВНЕОСЕВОЙ ОПТИКИ

А. П. Семенов, М. А. Абдулкадыров, А. Д. Тамбовский, В. Е. Патрикеев

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»
e-mail: lastro@lzos.ru

Аннотация. В данной работе представлены методы контроля и формообразования вогнутых и выпуклых крупногабаритных асферических внеосевых поверхностей оптических деталей.

В АО «ЛЗОС» уже много лет выполняются работы по изготовлению асферической осевой и внеосевой, вогнутой и выпуклой крупногабаритной оптики астрономического и космического назначения. В связи с тем, что современная оптика является высокоапертурной и высокоасферичной, а также с тем, что часто стали использоваться внеосевые асферические поверхности, не только вогнутые, но и выпуклые, изготовлению и контролю таких оптических деталей уделяется в последнее время особое внимание.

Возможность обработки таких поверхностей в первую очередь зависит от возможностей их контроля. Для контроля формы поверхности зеркал в настоящее время широко используются дифракционные оптические элементы (ДОЭ) или Computer Generated Holograms (CGH) в качестве корректоров волнового фронта. С их помощью выполняются контроль и центрировка асферической поверхности детали. Успешный контроль формы поверхности обеспечивает успех формообразования таких поверхностей [1, 2].

Результаты практической работы зеркал в реальных условиях в телескопах подтвердили надежность и эффективность разработанных методов формообразования внеосевых поверхностей оптических деталей диаметром до 1,5 метров.

Изготовлена целая серия высокоасферичных внеосевых зеркал, например, детали диаметром 1125 мм с внеосевой параболической поверхностью, с вершинным радиусом 6000 мм, с асферичностью 611 мкм, которые контролировались в вертикальной схеме с ДОЭ, преобразующим внеосевой асферический волновой фронт в сферический. $RMS = 0,048\lambda$ (0,015 мкм).

Выполнены работы по изготовлению трапециевидных матриц из астроситалла с выпуклой формой поверхности для прессования панелей главного зеркала из углепластика телескопа «Миллиметр» с размерами до 1,5 м и асферичностью около 20 мм на внешнем сегменте. Впервые продемонстрирована практическая реализация достижения точности поверхностей крупногабаритных матриц (СКО поверхности порядка 1 мкм) при их высокой асферичности. Важно отметить тот факт, что обозначенные матрицы — самые сложные в обработке, но при этом процесс их формообразования от стадии 45 мкм и 64 мкм до требуемых по спецификации величин порядка 1 мкм (RMS) был завершён за 14 сеансов. Этот процесс включает в себя стадии шлифования (шлифпорошки М40, М28, М14) и полирования матриц.

Литература

1. Семенов А. П., Абдулкадыров М. А., Патрикеев В. Е., Морозов А. Б., Насыров Р. К. Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании. Ч. 1 // Фотоника. 2022. Т. 16. № 4. С. 318–327.

2. Семенов А. П., Абдулкадыров М. А., Патрикеев В. Е., Морозов А. Б., Насыров Р. К. Методы контроля формы осевых и внеосевых асферических поверхностей с дифракционным оптическим элементом, определением децентрировки и учетом дисторсии при их формообразовании. Ч. 2 // Фотоника. 2022. Т. 16. № 5. С. 392–402.

КОАКСИАЛЬНО-ЛАМИНИРОВАННЫЕ РАДИАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫЕ ЛИНЗЫ ДЛЯ ВЫСОКОАПЕРТУРНЫХ ИНФРАКРАСНЫХ ОБЪЕКТИВОВ*

Г. И. Грейсах¹, И. А. Левин²

¹ Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

² ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»

e-mail: grey@pguas.ru

Аннотация. В работе представлены процесс моделирования коаксиально-ламинированных оптических материалов для радиально-градиентных линз и этапы компоновки и расчета простых по конструкции инфракрасных объективов с такими линзами. Продемонстрированы потенциальные возможности высокоапертурных средневолнового и двухдиапазонного инфракрасных триплетов, состоящих из двух однородных и одной радиально-градиентной линзы, а также сверхсветосильного двухдиапазонного градиентно-дифракционного объектива, полученного путем включения в схему триплета с градиентной линзой дифракционного оптического элемента.

Возрожденный в последние годы интерес к использованию градиентных линз для работы с инфракрасным излучением во многом обусловлен разработкой специальной серии новых марок прозрачных бескислородных стекол в широком диапазоне ИК-спектра. Преимуществом этих стекол является возможность создания на их основе композитных градиентных материалов методом ламинирования, заключающимся во взаимной термической диффузии слоев при спекании многокомпонентной заготовки [1].

В работе представлен процесс моделирования коаксиально-ламинированного оптического материала для градиентной линзы с радиальным распределением показателя преломления, значения оптических постоянных которой являются результатом расчета и оптимизации конструктивных параметров проектируемого объектива. Предложена бесконечно тонкая модель коаксиально-ламинированной радиально-градиентной линзы, имеющей ту же оптическую силу и продольный хроматизм, что и ее толстый прототип, которая вместе с тонкими однородными линзами может быть использована в качестве исходной схемы разрабатываемой оптической системы.

Эффективность предложенных подходов и потенциальные возможности достижения высоких оптических характеристик у простых по конструкции ИК-объективов с одной градиентной линзой продемонстрированы на примерах расчета объективов с задним фокусным расстоянием $f' = 40$ мм и угловым полем зрения $2\omega = 19,5^\circ$. Это два триплета, состоящие из двух однородных и одной радиально-градиентной линзы, предназначенные для работы в среднем (3–5 мкм) и двойном (3,5–5 и 8–11,9 мкм) ИК-диапазонах, и двухдиапазонный градиентно-дифракционный объектив, полученный путем включения в схему триплета с градиентной линзой дифракционного оптического элемента. Достигнутые оптические характеристики последнего позволят этому объективу в полной мере использовать потенциальные возможности таких коммерчески доступных неохлаждаемых микроболометров, как Bird 640 Ceramic Packaging BB Wide-Band и АСТРОН-64017-2 с форматом 640×512, шагом матрицы 17 мкм и частотой Найквиста $N = 30$ мм⁻¹.

Литература

1. Beadie G., Stover E., Gibson D. Temperature-dependent dispersion fitting for a recent infrared glass catalog // Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 10998. P. 1099804.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00081).

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЗОВОГО РАСТРА В СОСТАВЕ ПРИЕМНОГО КАНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

А. А. Невоструев¹, М. Р. Зарипов², И. Е. Гусаров^{1, 2}, А. И. Калугин²

¹ Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

e-mail: zaripov.istu@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается оптическая система приемного канала разрабатываемого макета лазерной локационной системы с многоэлементным фотоприемным устройством. Представлена оптическая схема, перечислен ее состав с указанием назначения отдельных компонент и описан принцип ее действия.

Лазерная локация находит широкое применение в навигации, геодезии, космических исследованиях и пр. [1]. В работе рассматривается макет лазерной локационной системы (ЛЛС), в состав которой входят несколько одноэлементных фотоприемных устройств на основе InGaAs, выстроенных в ряд. Такое решение позволяет существенно уменьшить время зондирования исследуемого пространства. Однако при этом не удастся расположить площадки ФПУ близко друг к другу. В результате применение обычного центрированного объектива приведет к возникновению «слепых» зон при регистрации сигнала, обратно отраженного от области зондирования.

Авторами предлагается пространственная оптическая система приемного канала, обеспечивающая концентрацию излучения, поступившего от каждого отдельного сектора зондируемого пространства на площадке каждого из ФПУ, что исключит формирование «слепых» зон. На рис. 1 представлена ее схема.



Рис. 1. Оптическая схема приемного канала макета ЛЛС

Первичный объектив формирует промежуточное плоское линейное поле, каждый участок $2y_i$ которого впоследствии проецируется линзовым растром в пятно размером $2y'_i$ на чувствительных площадках каждого из ФПУ. При этом в систему введен коллектив, размещенный в плоскости промежуточного поля и необходимый для перенаправления лучей от каждого участка линейного поля $2y_i$ в соответствующий ему элемент раstra.

Литература

1. Насенник В. Г. О лазерной локации луноходов / В. Г. Насенник // Космические исследования. 2023. Т. 61. № 3. С. 258–264.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КРУПНОГАБАРИТНОГО ИК-РАДИОМЕТРА С ДЕЛЕНИЕМ ПОЛЯ МЕЖДУ КАНАЛАМИ

И. А. Боголюбов, Ю. В. Бажанов, В. Н. Мокшанов

АО «НПК «СПП»»
e-mail: otchel110@npk-spp.ru

Аннотация. При решении пеленгационной и радиометрической задач по малоконтрастному объекту наблюдения (ОН) необходим компромисс между полным и мгновенным угловым полем спектральных каналов радиометра. В докладе описывается оптическая система радиометра с делением поля между каналами и со сканированием поля.

Телескоп метрового класса, работающий в среднем и дальнем ИК-диапазонах, должен сканировать поле изображения для того, чтобы эффективно выделять слабый сигнал на высоком и изменяющемся фоне [1]. Максимальное угловое поле телескопа удобно определить из условия равенства диаметра отверстия в главном зеркале диаметру вторичного зеркала, в таком случае в оптическую систему не будет попадать дополнительный фоновый поток (формула (1)):

$$2\omega_{\max} = k_{\varepsilon} \cdot \frac{D}{f}, \quad (1)$$

где k_{ε} — коэффициент экранирования главного телескопа.

Для величин экранирования 0,3 и относительного отверстия 1:4 получаем поле $\approx 4^\circ$, что является характерным для широкоугольных телескопов метрового класса, работающих в оптическом и ближнем ИК диапазоне и решающих задачи прикладной астрономии [2].

С применением ИК проекционных систем полное большое поле главного телескопа можно разделить между многоэлементными ФПУ с охлаждаемыми диафрагмами на разные спектральные диапазоны, образовав соответствующие приемные каналы внутри одной крупногабаритной апертуры. Так как каналы независимы и требуют обеспечения сканирования, то при реализации способа быстрой коммутации текущего поля между каналами их работу можно считать одновременной. Мы предлагаем использовать управляемую перископическую систему, расположив ее в плоскости промежуточного изображения радиометра (формула (2)):

$$\Delta d(\Delta\varphi) := \frac{d}{\cos(\varphi)} \cdot \left[\cos(\varphi) - \frac{\cos(\varphi - \Delta\varphi)}{(1 + \sin(2 \cdot \Delta\varphi))} \right], \quad \Delta\Pi(\Delta\varphi) := \frac{d}{\cos(\varphi)} - \frac{d - \Delta d(\Delta\varphi)}{\cos(\varphi - \Delta\varphi)} \cdot \cos(2 \cdot \Delta\varphi), \quad (2)$$

где $\Delta\varphi$ — угол наклона перископа; Δd — необходимое перемещение зеркал перископа для сохранности величины оптического пути; $\Delta\Pi$ — изменение расстояния между входящим и выходящим лучом, приводящее к изменению участка поля наблюдения.

В процессе оптимизации оптической системы мы стремились комплексировать спектральные каналы на одной крупногабаритной апертуре, чтобы уменьшить количество внешних каналов, сократить вес и размеры радиометра и в результате перевести крупногабаритный ОЭК в класс мобильных и возимых систем.

Литература

1. Тергоев В. И., Еселевич М. В., Клунко Е. В., Коробцев И. В., Папушев П. Г. Разработка и применение ИК-камеры для регистрации тепловых портретов космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 6(39). С. 165–169.
2. Денисенко С. А., Камус С. Ф., Пименов Ю. Д., Тергоев В. И., Папушев П. Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 48–51.

РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ, ЗАПИСАННЫЕ ВО ВСТРЕЧНЫХ ПУЧКАХ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

С. Н. Гуляев¹, Н. М. Ганжерли², И. А. Маурер², Д. А. Ильюшина¹

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе

e-mail: gulyaev@rphf.spbstu.ru

Аннотация. Желатиносодержащие светочувствительные среды могут быть подвергнуты двум основным альтернативным методам обработки, включающим в себя либо структурирование, осуществляемое химически с помощью избирательного дубления желатина в присутствии бихроматов, либо деструкцию, реализуемую путем фотодеградации желатина под воздействием коротковолнового УФ-излучения. Одновременное применение этих методов для обработки бихромированного желатина и галогидосеребряной фотоэмульсии в сочетании с коротким травлением позволило, используя конаправленную схему записи, получить работающие на пропускание высокоэффективные рельефно-фазовые решетки вплоть до пространственных частот 1200–1600 мм⁻¹ [1]. В настоящей работе для записи рельефно-фазовых решеток исследуется возможность применения контрнаправленной голографической схемы записи, предложенной Денисюком для регистрации отражательных голограмм. Поверхностную пространственную частоту записываемых голографических структур в данном случае можно изменять в широких пределах (0–3175 мм⁻¹) за счет изменения наклона штрихов внутренней решетки относительно плоскости поверхности светочувствительной среды.

Поверхностная голографическая структура может быть реализована путем устранения внутренней решетки, штрихи которой идут с периодом, примерно равным половине длины волны света в светочувствительной среде, и образования рельефа на поверхности последней. Впервые это было сделано в работе [2], где использовались тонкие слои фоторезиста, в котором вытравливались углубления, позволяющие, используя Z-характеристику фоторезиста, получить пилообразный профиль рельефа. До сих пор контрнаправленная схема применяется в спектроскопии для изготовления голографических решеток с углом блеска после металлизации поверхности [3].

В отличие от фоторезиста галогидосеребряная эмульсия (в работе использовался фотоматериал ПФГ-01) имела на порядок большую толщину (~7 мкм) и существенно меньший контраст создаваемых фазовых изображений. В экспериментах формирование поверхностной рельефной структуры производилось такими же методами обработки, которые ранее использовались для записи рельефных решеток в конаправленной оптической схеме [1]. Начальный этап обработки состоял в создании первичной голографической структуры в виде серебряного изображения интерференционных полос голограммы с помощью экспонирования когерентным излучением He-Ne лазера, проявления и фиксирования. На втором этапе обработки осуществлялось избирательное дубление фотоэмульсии в отбеливателе R-10 на основе бихромата и удаление соединений серебра из фотоэмульсионного слоя за счет второго фиксирования. В ходе этого этапа обработки на поверхности фотоэмульсионного слоя создавался эффективный модулятор для последующего воздействия коротковолнового УФ-излучения ртутной лампы на желатин, состоящего в фотодеградации желатина в наименее задубленных участках. Последним шагом фотохимической обработки являлось короткое травление (10 сек.) фотоэмульсионного слоя в растворах ледяной уксусной кислоты в изопропанолу в соотношении 1:0 или 1:1, необходимое для формирования рельефа и повышения отклика фотоматериала на высоких пространственных частотах.

Измерение дифракционных эффективностей (ДЭ) образцов голографических решеток на пропускание на разных поверхностных пространственных частотах ν выя-

вило особенности поведения светочувствительной среды, подвергнутой сложной многошаговой обработке (рис. 1).

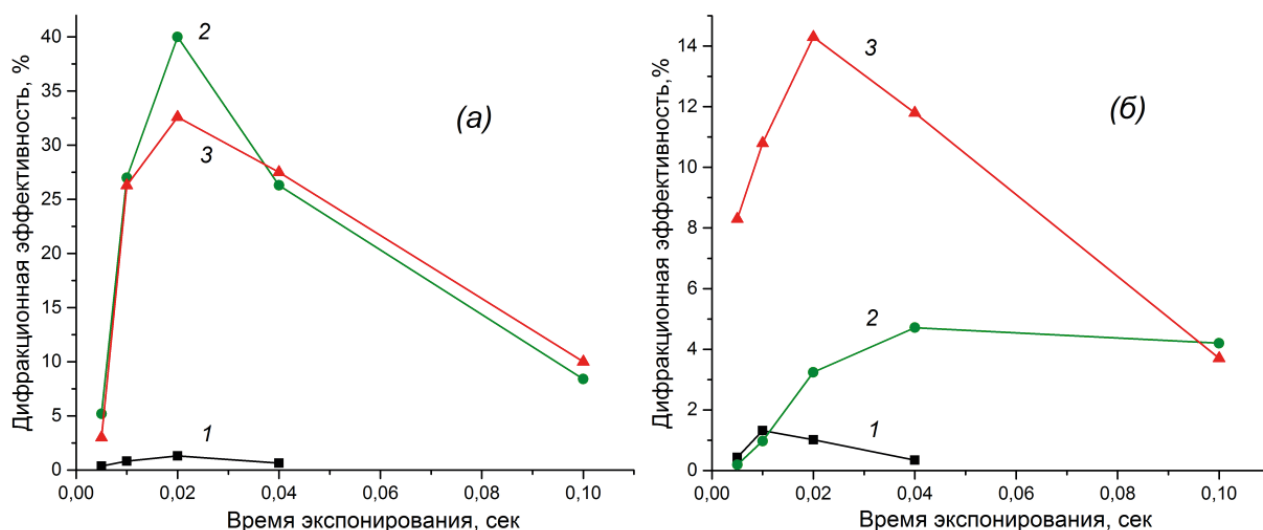


Рис. 1. Зависимости ДЭ от времени экспонирования когерентным излучением He-Ne лазера для пространственной частоты: (а) $\nu = 100 \text{ мм}^{-1}$, (б) $\nu = 340 \text{ мм}^{-1}$

1 — ДЭ первичной амплитудной голограммы; 2 — ДЭ рельефно-фазовой голограммы после избирательного дублирования; 3 — ДЭ рельефно-фазовой голограммы после облучения УФ-излучением и травления

Из рисунка видно, что в области сравнительно низких пространственных частот $\nu \leq 100 \text{ мм}^{-1}$ рельеф формируется преимущественно силами натяжения, возникающими при сушке мокрого коллоида, в то время как в области высоких пространственных частот $\nu \geq 340 \text{ мм}^{-1}$ добавление операций облучения и травления многократно увеличивает высоту рельефа и ДЭ голографических структур. Эксперименты также выявили характерную особенность применения галогидосеребряной фотоэмульсии в контрнаправленной схеме. В отличие от фоторезистов, для которых предельная глубина травления составляла порядка половины длины волны, на галогидосеребряном фотоматериале на низких частотах удастся получить рельефы высотой 1–1,6 мкм, что значительно превышает длину волны регистрирующего голограмму излучения лазера.

Литература

1. Архипов А. В., Ганжерли Н. М., Гуляев С. Н., Маурер И. А. Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 3. С. 38–47.
2. Sheridon N. K. Production of blazed holograms // Appl. Phys. Lett. 1968. Vol. 12. No. 9. P. 316–318.
3. Павлычева Н. К. Дифракционные решетки для спектральных приборов. Обзор // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 3. С. 28–41.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ШИРОКОСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК НАБОРА ПОЛИХРОМАТИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ

А. В. Бахолдин, А. В. Уварова

Университет ИТМО
e-mail: alla.uvarova@itmo.ru

Аннотация. В работе представлена методика оптимизации широкоспектральных оптических систем как набора полихроматических конфигураций на примере оценки качества изображения зеркального микрообъектива $f' = 5$ мм, $NA = 0,8$ [1], спроектированного в трех исполнениях: в общей широкоспектральной конфигурации (0,2...2 мкм), наборе монохроматических и наборе полихроматических конфигураций.

Дифракционная и геометрическая ЧКХ (частотно-контрастная характеристика) — широко применимые критерии оценки качества изображения, особенно эффективные для проектирования оптических систем с матричным приемником: установленный размер пиксела матрицы четко определяет области интереса на графиках ЧКХ в соответствии с теоремой Котельникова. Вместе с тем, применение ЧКХ как критерия оценки качества и оптимизационного параметра для систем широкого спектрального диапазона имеет ряд существенных ограничений, которые определяются математическим аппаратом их реализации в коммерческом программном обеспечении.

Полихроматическая ЧКХ представляет собой усредненную кривую графиков ЧКХ заданных длин волн, максимальная частота графика соответствует минимальной длине волны — по ней удобно получить общее представление о качестве изображения системы. Чем уже рабочий спектральный диапазон, тем точнее будет оценка качества по полихроматической ЧКХ. Примером удачного применения этой характеристики является видимый спектральный диапазон. Также полихроматическая ЧКХ как критерий оптимизации является удачным операндом, поскольку позволяет рассчитывать системы в единой конфигурации. Тем не менее, при расчете полихроматической ЧКХ не происходит интерполяция значений — следовательно, такой критерий оптимизации не гарантирует того, что ее среднее удовлетворительное качество не является средним между хорошим качеством на одной длине волны и провалом контраста на другой длине волны. Компромиссом по гарантии обеспечения высокого контраста является усложнение набора условий оптимизации и оценка оптической системы как набора монохроматических конфигураций контрольных длин волн. Но в таком случае оптимизация не учитывает хроматические aberrации системы.

Описанные подходы, имеющие широкое применение в проектировании оптических систем [2], являются компромиссными по точности и быстродействию расчетов. Для оптимизации и оценки качества изображения широкоспектральных оптических систем предлагается представлять широкий спектральный интервал как набор полихроматических конфигураций вместе с методикой определения ширины спектральных интервалов.

Литература

1. Uvarova A., Bakholdin A. Analysis of image quality requirements for multispectral mirror systems // Proc. SPIE. Optical Design and Testing XII. 20 December 2022. Vol. 12315. P. 123150F.
2. Ye H., Zhang J., Zhao S., Liu M., Zhang X. Analysis and Prediction of Image Quality Degradation Caused by Diffraction of Infrared Optical System Turning Marks // Photonics. 2023. No. 10(8). P.937.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИК ПОДБОРА ИНТРАОКУЛЯРНОЙ ЛИНЗЫ ПО КРИТЕРИЯМ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Е. А. Буракова, А. В. Бахолдин

Университет ИТМО
e-mail: khorosheva_ea@itmo.ru

Аннотация. В данной работе проводится исследование возможных послеоперационных последствий лазерных операций с целью разработки методик расчета индивидуальной интраокулярной линзы с использованием расчетной оптической программы Zemax.

Ежегодно увеличивается количество людей, которые избавляются от необходимости постоянного ношения очков или контактных линз благодаря современным технологиям в офтальмологии. Лазерные операции по коррекции зрения во всем мире являются одними из наиболее частых микрохирургических вмешательств. Лазерные методики требуют серьезного отношения к планированию, чтобы предупредить развитие негативных последствий и минимизировать вероятность того, что возникнут осложнения после лазерной коррекции.

Одной из лазерных методик является ЛАСИК (LASIK) — самый современный и надежный способ коррекции зрения. Эта методика лечения различных видов глазных заболеваний при помощи лазера признана самой щадящей и безопасной, так как она не вредит роговице глаза.

Частота кератэктазий, которые возникают после рефракционных эксимерлазерных операций на роговице, в частности, выполненных методом LASIK, с каждым годом возрастает. И все же основная задача специалистов-офтальмологов — свести к минимуму саму возможность возникновения ятрогенной кератэктазии после лазерной коррекции зрения. Ятрогенные кератэктазии чаще связаны с широким применением кераторефракционных операций: ФПК, LASIK, радиальной кератотомии, кератопластики, а также могут возникать после травм и полостных операций. Основные причины возникновения кератэктазий: латентные дисфункции РО, неустойчивость биомеханики роговицы, повышение офтальмотонуса, моргание и натирание глаз [1].

Большинство специалистов утверждают, что для предотвращения нестабильности и ослабления роговицы после лазерной абляции ее остаточная толщина не должна быть менее 250 микрон. Однако недавние исследования показали, что такой толщины недостаточно. Уже описаны случаи, когда на роговице, сохранность ткани которой составляла 250 микрон и более, также появлялись послеоперационные эктазии. Послеоперационные эктазии, как правило, возникают у людей после 40 лет.

После лазерной коррекции LASIK радиус роговицы человеческого глаза меняется, и подобрать стандартную оптику становится сложнее, а бывает даже невозможно.

В рамках данного исследования был проведен обзор существующих методик лазерной коррекции, приборной базы для возможности проведения топографии глаза, расчета методики подбора интраокулярной линзы.

Литература

1. Суркова В. К., Халимов А. Р., Казакбаева Г. М. Кератэктазии и современные методы их лечения // Точка зрения. Восток — Запад. 2021. № 2. С. 84–88.

АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ СКАНИРОВАНИЯ С БЕСПИЛОТНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

П. А. Кравцов, Д. А. Титов, В. А. Рыжова

Университет ИТМО
e-mail: platonex@bk.ru

Аннотация. В этой работе представлены принципы адаптивной фильтрации для получения гиперспектральных данных в условиях работы с беспилотных носителей. Представленный алгоритм позволяет развивать технологию создания программно-аппаратных гиперспектральных комплексов для сканирования с беспилотных носителей [1].

Данная работа проводилась с целью решения следующих задач:

- повысить пространственную разрешающую способность без потери спектральной разрешающей способности;
- автоматизировать процесс отсева и интерпретации гиперспектральных данных в условиях работы на беспилотных носителях;
- увеличить эффективность определения границ зон интереса при сканировании рельефной местности.

На рис. 1 представлен алгоритм обработки гиперспектральных данных.

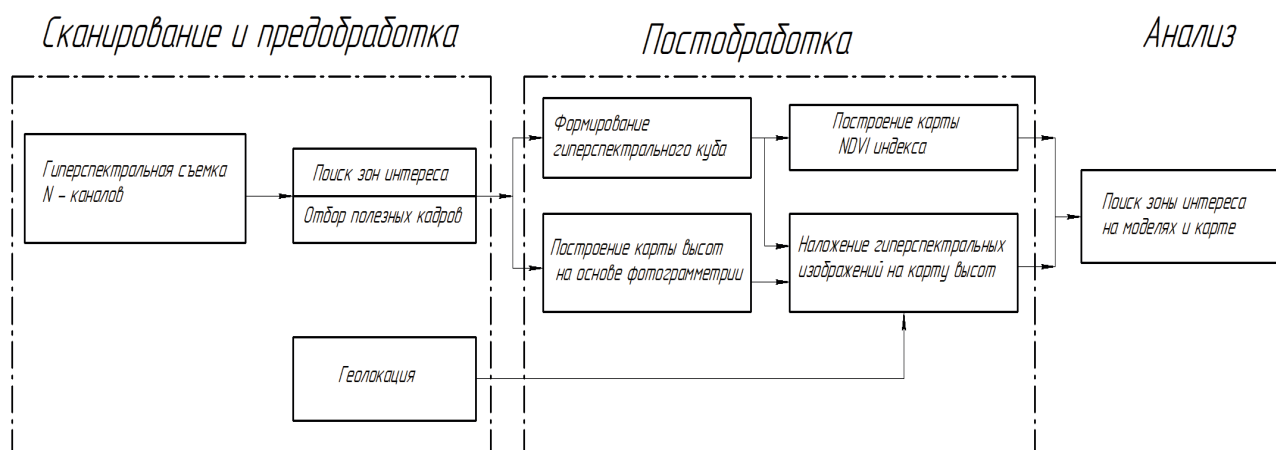


Рис. 1. Алгоритм обработки гиперспектральных данных

Процесс отбора полезных кадров основан на технологии сверточной нейронной сети (СНС), которая активно применяется для обработки изображений и непрерывного потока данных, в том числе гиперспектральных данных [2]. На рис. 2 представлена схема информационного потока, описывающая принцип выбора определенного алгоритма обработки и интерпретации гиперспектральных данных.

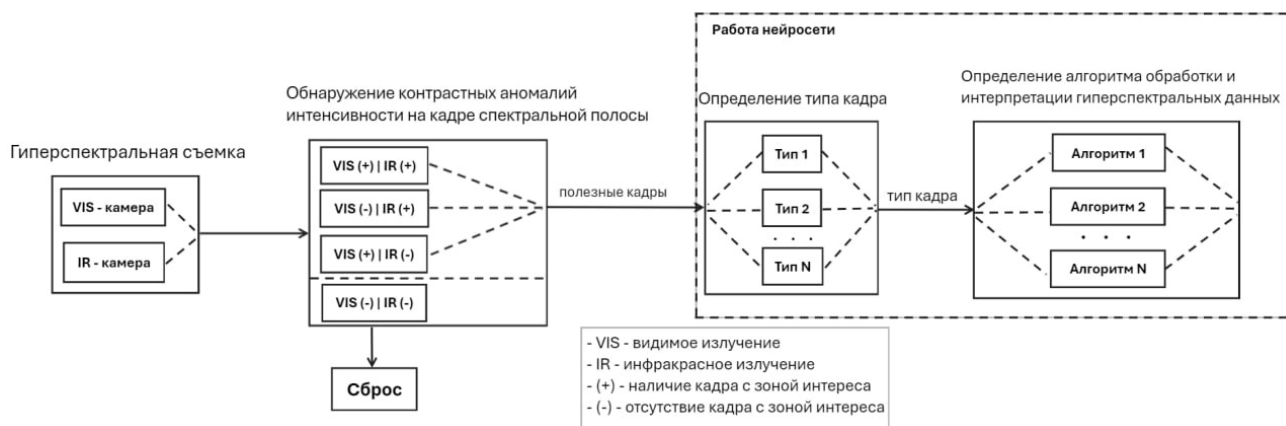


Рис. 2. Схема информационного потока

В процессе работы были получены эффективные методы фильтрации и интерпретации гиперспектральных данных, а также определены этапы развития системы автоматизированного обнаружения зон интереса при гиперспектральной съемке.

Литература

1. Рыбников П. А., Бузина Д. А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 55–70.
2. Shambulinga M., Sadashivappa G. Hyperspectral Image Classification using Convolutional Neural Networks // IJACSA. 2021. Vol. 12. No. 6. P. 702–708.

РАСЧЕТ ОБЛУЧЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЗЕМЛИ

П. А. Меденников, Н. И. Павлов

АО «НИИ оптико-электронного приборостроения»
e-mail: medennik@rambler.ru

Аннотация. Представлены модель излучения Земли и итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности элементарной площадки (фасета) космического объекта с применением инженерных расчетных методик и численных оценок оптических характеристик атмосферы.

Математическое моделирование энергетических отражательно-излучательных характеристик объектов в околоземном пространстве требует разработки адекватной модели излучения Земли. Особого внимания заслуживают объекты на низких орбитах в силу значительной изменчивости условий подсветки со стороны Земли в процессе траекторного движения. Необходимость моделирования как переотраженного солнечного, так и собственного теплового излучения Земли предполагает применение весьма сложных алгоритмов и большой объем вычислений с использованием компьютерных моделей типа MODTRAN. Значительные сложности вызывает расчет вклада, вносимого облачностью в суммарную облученность, а также расчет вклада длинноволнового инфракрасного излучения атмосферы в диапазоне от 15 до 50 мкм. В связи с этим разработка физически адекватной модели излучения Земли и методики расчета облученности космического объекта, реализуемой с помощью алгоритмов, которые адаптивно подстраиваются к изменяющимся условиям подсветки, учитывают указанные выше факторы и не требуют огромного объема вычислений, является актуальной задачей при проектировании оптико-электронных приборов контроля околоземного космического пространства.

Земля рассматривается как протяженный источник рассеянного солнечного и собственного теплового излучения, являющийся совокупностью (суперпозицией) точечных источников — элементарных, послойно расположенных фрагментов атмосферы и подстилающей поверхности с постоянными характеристиками. Ввиду наличия сильной зависимости оптических характеристик земной поверхности и высотного профиля атмосферы от географических координат в предлагаемой модели используется деление земной поверхности на 11 климатических зон (моделей) и деление атмосферы на высотные слои, внутри которых они могут считаться однородными. Используется способ геометрического разбиения участвующего в облучении шарового сегмента земной поверхности с центром в текущей «подспутниковой» точке на элементарные фрагменты, программное задание параметров расчета спектральной плотности энергетической яркости, а также сочетание итерационной процедуры расчета яркости с инженерными методиками расчета оптических характеристик атмосферы. В представленной работе исследование является естественным развитием программно-алгоритмического комплекса имитационного моделирования, предназначенного для исследования и разработки оптико-электронных систем различного назначения и исполнения [1, 2].

Литература

1. *Абакумова А. А., Малинова Т. П., Меденников П. А., Павлов Н. И.* Программно-алгоритмический комплекс имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем // *Оптический журнал*. 2019. Т. 86. № 8. С. 56–64.
2. *Меденников П. А., Павлов Н. И.* Модель и алгоритм расчета облученности космического объекта излучением Земли // *Оптический журнал*. 2024. Т. 91. № 9. С. 18–28.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗЕРКАЛ ИЗ НЕДЕФИЦИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д. Б. Никитин, В. А. Русов

АО «НПО ГОИ им С. И. Вавилова»
e-mail: dbnik@list.ru

Аннотация. В данной работе была рассмотрена возможность обеспечить серийное изготовление оптических элементов из ограниченного спектра алюминиевых сплавов, одновременно обеспечивающих их приемлемую стоимость изготовления и, одновременно, их функциональную надежность.

В настоящее время потребность в зеркальных элементах из недорогих недефицитных материалов резко возрастает [1]. Очевидным путем решения является использование зеркал из алюминиевых сплавов. Основной проблемой при их использовании является сложность получения оптического качества на отражающей рабочей поверхности.

Целью работы является восстановление на современном технологическом уровне технологии создания зеркал, в том числе сканирующих, из недефицитных материалов, работоспособных в наземных нестационарных условиях, и разработка технологических решений, удовлетворяющих требованиям серийного производства.

Преимуществом металлических оптических узлов является то, что металлы значительно легче поддаются механической обработке. Если же этот металл не дефицитен, то преимущество его использования возрастает во много раз. Отпадают задачи крепления разнородных материалов и появляются дополнительные возможности облегчения оптической системы. Наиболее актуально это становится при создании плоского оптического отражателя, совершающего регулярное движение (сканирующий оптический элемент).

Была проведена систематизация многолетних исследований и имеющихся технологических заделов создания зеркал оптического качества, в частности, из спектра металлических (прежде всего — алюминиевых) сплавов. На этой базе на следующем этапе предполагается разработка научно-технических основ российской промышленной технологии создания рабочих поверхностей значительно облегченных зеркал.

Работа проводилась по следующим направлениям:

- разработка требований к материалам зеркал;
- выбор технологических путей получения корпусов зеркал;
- разработка процессов размерной стабилизации корпусов зеркал;
- разработка процессов оптической обработки материала подложки либо предварительно нанесенным конструкционным покрытием с интерферометрическим измерением точности формы рабочей поверхности;
- разработка процессов чистки оптических поверхностей на используемых металлических сплавах;
- разработка комплексного процесса создания сканирующих зеркал из используемых сплавов, включая нанесение отражающих покрытий;
- исследование границ работоспособности зеркал при температурных воздействиях.

Основные характеристики реализуемых зеркальных элементов.

Максимальные габаритные размеры составляют до 400 мм.

Предполагаемая степень облегчения: 50–70 %.

Предполагаемый температурный режим функционирования: от +60 °С до –60 °С.

Литература

1. Химич Ю.П., Никитин Д.Б., Стариченкова В.Д., Малышев И.В. Усовершенствование технологии изготовления крупногабаритных заготовок зеркал из карбида кремния // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 6.

РАЗРАБОТКА МАКЕТА СЕГМЕНТИРОВАННОГО БЕРИЛЛИЕВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ПРОЕКТА ОРБИТАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Д. Б. Никитин, В. А. Русов

АО «НПО ГОИ им С. И. Вавилова»
e-mail: dbnik@list.ru

Аннотация. В данной работе предлагается восстановить и развить разработанную эффективную производственную технологию изготовления бериллиевых зеркал, но уже на принципиально другом уровне, за счет применения современного оборудования и многолетних компетенций, наработанных в прошедшие годы.

25 декабря 2021 года была запущена крупнейшая орбитальная инфракрасная лаборатория — космический телескоп «Джеймс Уэбб». Стоимость этого совместного проекта НАСА и Европейского космического агентства составила около 10 млрд долларов [1]. Диаметр главного составного сегментированного зеркала — 6,5 метров. Материал сегментов — бериллиевый сплав. На сегодняшний день это единственный материал, в полной мере позволяющий удовлетворить экстремальные требования к облегченным конструкциям аэрокосмического базирования [2].

В нашей стране у истоков использования бериллиевых сплавов для создания облегченных оптических элементов космического базирования стояли Государственный оптический институт (г. Ленинград) и производственное объединение «ЛОМО» (г. Ленинград).

С учетом того, что нам удалось сохранить значительный технологический задел, предлагается качественно переработать и реализовать его, уже используя современный парк термического и станочного оборудования.

На первой стадии работы предполагается создание макета одного облегченного зеркального сегмента из порошкового бериллия. Технология изготовления макета, а также подключение предприятий-контрагентов на отдельных этапах нами проработаны. Эти этапы включают механическую, термическую и оптическую обработки, а также нанесение всех необходимых покрытий (конструкционного, отражающего и защитного). На изготовленном зеркальном сегменте будет проведен необходимый комплекс испытаний. Создание такого макета наглядно подтвердит возможность создания конечного продукта и подчеркнет его ключевые преимущества.

Изготовленный макет будет весьма представительным и позволит наглядно продемонстрировать возможности реализации в нашей стране одной из самых востребованных в мире технологий создания больших зеркал и сегментов зеркал космического базирования.

В случае успешного завершения описанного аванпроекта и появления интереса в развитии этой работы, в частности, у ГК «Роскосмос» и ГК «Росатом», следующие стадии работы предполагают увеличение габаритных размеров сегментов, улучшение характеристик облегчения (вплоть до 85–90 %) и комплектацию нового макета приводами позиционирования.

Такое последовательное выполнение работ и последовательное представление результатов позволит оперативно корректировать дальнейшие направления деятельности.

Начало работы по созданию аналога упомянутой орбитальной обсерватории определяет одно из направлений развития космического приборостроения в стране и даст возможность подтвердить разносторонность, технологическую компетентность и глобальность космических интересов России.

Литература

1. Телескоп «Джеймс Уэбб» приготовился наблюдать за Вселенной // Секрет фирмы: интернет-портал. 09.01.2022. <https://secretmag.ru> > Материалы (дата обращения: 01.09.2024).
2. Космическое зеркало из бериллия // Редкие земли: интернет-портал. 29.04.2014. <https://rareearth.ru> > .pub (дата обращения: 01.08.2024).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИЦЕЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАВЕДЕНИЯ

А. В. Григорьев, А. Е. Прокофьев

АО «Вологодский оптико-механический завод»
e-mail: science@vomz.ru

Аннотация. В работе представлены экспериментальные результаты измерений амплитуды колебаний линии визирования оптического прицела имеющего систему стабилизации головного зеркала при различных скоростях наведения в вертикальной и горизонтальной плоскости, полученные с помощью высокоскоростной системы технического зрения.

Система стабилизации головного зеркала танковых оптических прицелов должна обеспечивать амплитуду колебаний линии визирования в вертикальной и горизонтальной плоскости при наведении со скоростями наведения до 5 °/с, не превышающую десятков угловых секунд [1].

В работе рассматривается метод измерения угловых отклонений линии визирования от заданного положения с использованием высокоскоростной системы технического зрения. Измерительная система обеспечивает высокую точность измерений при высоком быстродействии. Используемая в рассматриваемой системе технического зрения 0.4 Мп видеокамера обеспечивала быстродействие 980 кадров в секунду. Применяемый корреляционный алгоритм вычисления центра тяжести изображения позволил вычислять и скорость наведения и амплитуды колебаний линии визирования.

На рис. 1 показан экран компьютерной программы, разработанной для данной измерительной системы.



Рис. 1. Экран компьютерной программы измерительной системы

Среднеквадратическая погрешность измерения угловых колебаний линии визирования составила ± 0.5 угловых секунды, при этом погрешность измерения скорости наведения не превышала ± 0.0005 °/с.

Литература

1. *Малков М.А.* Танковые прицелы и приборы наблюдения (основания устройства) / М.А. Малков. М.: Воениздат, 1961. 240 с., ил. 21.

Секция 2

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСЛАБЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ СТЕКЛАМИ

В. И. Арбузов

Санкт-Петербургский государственный университет
гражданской авиации им. А. А. Новикова
e-mail: varbuzov1749@mail.ru

Аннотация. В данной работе рассматриваются факторы, определяющие количественные характеристики ослабления рентгеновского и гамма-излучения оптическими стеклами. Рассмотрены уравнения, позволяющие с высокой точностью рассчитать ЛКОИ стекол по их плотности.

Воздействие рентгеновского и гамма-излучения на оптические стекла приводит к радиационному окрашиванию элементов (линз) объективов тем менее эффективному, чем ниже значения их линейных коэффициентов ослабления излучения (ЛКОИ). В случае смотровых радиационно-защитных окон (СРЗО) «горячих» камер требуются стекла с максимально высокими значениями ЛКОИ. При этом, и для объективов, и для СРЗО важно, чтобы ослабление визуальной пропускающей способности стекол, вызванное радиационным окрашиванием, было минимальным. В свою очередь, ЛКОИ любого стекла зависит от массовых коэффициентов ослабления излучения (МКОИ) оксидов, входящих в его состав. В итоге ЛКОИ стекла равен сумме произведений массовых долей (a_i) оксидов [1] на значения их МКОИ [2] для заданных значений энергий квантов, E , $[(\mu_i(E)/\rho_i)_{окс}]$, умноженной на плотность стекла, ρ [3] (формула (1)):

$$\mu = \Sigma[a_i \cdot (\mu_i(E)/\rho_i)_{окс}] \cdot \rho. \quad (1)$$

Значения МКОИ оксидов определяются суммой произведений массовых долей катионов (МДК) и кислорода (МДО) на значения их МКОИ, известных из литературы [4].

Установлено, что сравнительно «легкие» (базовые) оксиды (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , Na_2O , K_2O , CaO , ZnO , Al_2O_3), входящие во все типы кроновых стекол и свинецсодержащих стекол флинтвой группы, характеризуются сравнительно слабой зависимостью МКОИ от E . В отличие от них более «тяжелые» оксиды (PbO , Ta_2O_5 , La_2O_3 , BaO , CdO , Y_2O_3 , ZrO_2), применяемые для получения стекол определенных марок, демонстрируют сильную зависимость МКОИ от E в диапазоне энергий от 0,2 до примерно 1,0 МэВ, а в области более высоких энергий квантов — близкую к таковой для базовых оксидов (рис. 1).

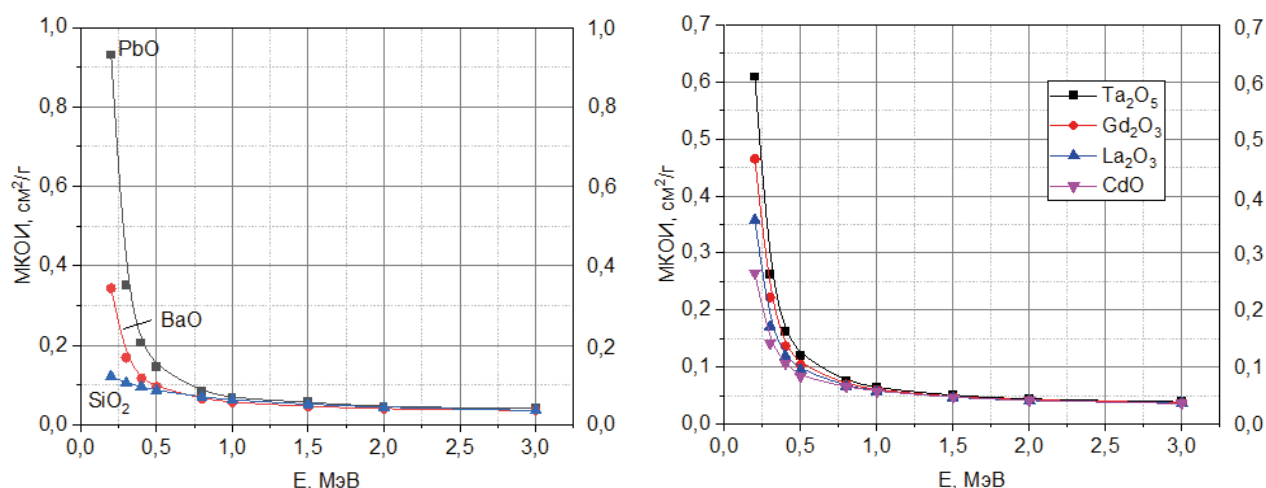


Рис. 1. Энергетические зависимости массовых коэффициентов ослабления излучения оксидов, используемых в производстве оптических стекол

Для излучений с E , равными 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 и 3,0 МэВ, значения ЛКОИ кроновых стекол и свинецсодержащих стекол флинтовой группы укладываются на прямые линии в зависимости от плотности, углы наклона которых уменьшаются с ростом E . Выведенные уравнения, описывающие эти прямые линии, позволяют с высокой точностью рассчитать ЛКОИ стекол по их плотности.

Таким образом, элементный состав стекла (типы и количественное соотношение их концентраций), его плотность и энергия квантов излучения определяют значения его ЛКОИ.

Литература

1. ОСТ 3-4888-80. Стекло оптическое бесцветное. Синтетический состав. 1981. Тип. ГОИ им. С. И. Вавилова.
2. Арбузов В. И. Влияние элементного состава оптических стекол на количественные характеристики ослабления ими рентгеновского и гамма-излучения // Физика и химия стекла. 2024. Т. 50. № 1. С. 32–42.
3. Бесцветное оптическое стекло СССР. Каталог / под ред. Г. Т. Петровского. М.: Дом оптики, 1990. 132 с.
4. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения. Справочник. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.

ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ

*Е. Ю. Кабыкина, А. Е. Львов, И. В. Южаков,
П. В. Пестерева, Л. В. Жукова*

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты измерения показателя преломления плоскопараллельного образца 30 мас. % AgI в AgBr в двух диапазонах частот — 250–1000 см⁻¹ и 700–1200 см⁻¹, а также выявлена зависимость исследуемого оптического параметра от изменения температуры — от комнатной температуры до 200 °С.

Технологический прогресс не стоит на месте, и в сфере инфракрасной оптики стали широко применяться материалы на основе галогенидов серебра. В научной лаборатории волоконных технологий и фотоники разрабатываются новейшие материалы, требующие детального изучения и определения стандартных оптических характеристик и особых свойств. Галогенидсеребряные монокристаллы проявили себя как материал, обладающий широким диапазоном пропускания — от 0,4 до 60,0 мкм, пластичностью, нетоксичностью, негигроскопичностью. Одной из важных оптических характеристик является показатель преломления.

Спектроскопическим методом [1] по формуле (1) с применением ИК-Фурье-спектрофотометра IRPrestige-21 был рассчитан показатель преломления

$$n = \frac{N \cdot 10^4}{2d \cdot (v_2 - v_1)}, \quad (1)$$

где v_i — спектроскопическая частота (определяемая по снятым спектрам), см⁻¹;

N — количество пиков интерференции для выбранного диапазона v ;

d — толщина пластинки в месте просвечивания, равная 369 мкм.

Для исследования влияния температуры на изменения показателя преломления при нагреве была изготовлена специальная керамическая оснастка с нагревательным элементом и термопарой. Исследуемый образец помещается в оснастке между двумя керамическими пластинами, после чего закрепляется в спектрометре и подвергается медленному нагреву. С помощью ПИД-регулятора контролируются мощность нагревательного элемента и температура образца. Измерения проводились при температурах 26, 50, 100, 150 и 200 °С. По результатам исследования было выявлено, что с ростом температуры показатель преломления нелинейно повышается во всем диапазоне частот.

Благодаря созданной установке, включающей в себя нагревательный элемент, термопару, оснастку для нагревания пластинки, можно экспериментально подтвердить, что показатель преломления в образце 30 мас. % AgI в AgBr повышается с увеличением температуры.

Литература

1. Salimgareev D., Lvov A., Zhukova L., Belousov D., Yuzhakova A., Shatunova D., Korsakov A., Ishchenko A. Optical properties of the AgBr-AgI system crystals // Optics and Laser Technology. 2022. No. 149. P. 107825.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

*П. В. Пестерева, Д. Д. Салимгареев, А. Е. Львов,
А. А. Южакова, Л. В. Жукова*

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Аннотация. Представлено экспериментальное исследование влияния способа получения твердых растворов на функциональные свойства монокристаллов и оптической керамики.

Исследование оптических и механических свойств материалов является важным разделом материаловедения и необходимо для дальнейшей разработки и изготовления оптических изделий. Ранее были разработаны монокристаллы и двухфазная керамика системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}\text{--AgI}$ [1] и выявлено, что в зависимости от способа получения в рамках одного состава 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ (рис. 1) изменяются внешний вид образца, значение показателя преломления и повышается коэффициент экстинкции для керамических материалов. Для расширения элементной базы оптических материалов с различными функциональными свойствами проведено исследование влияния технологии получения в системе $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}\text{--TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ на их функциональные свойства.



20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ (из монокристалла) 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ (из керамики, ТЗКС) 20 мол. % AgI в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$ (из керамики, мех. смесь)

Рис. 1. Образцы пластин на основе твердых растворов системы $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}\text{--AgI}$

Для реализации эксперимента были подготовлены три образца одного состава (15 мол. % $\text{TlBr}_{0,46}\text{I}_{0,54}$ в $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}$) — выращен монокристалл методом Бриджмена, синтезирована оптическая керамика методом направленной кристаллизации и получена керамика из механической смеси двух исходных компонентов. Методом термозонной кристаллизации-синтезом (ТЗКС) была получена высокочистая шихта для выращивания монокристалла и синтеза оптической керамики [1]. За счет получения шихты по методу ТЗКС и оптимальной скорости кристаллизации оптические свойства керамики близки к свойствам монокристалла. Диапазон спектрального пропускания материалов составляет 0,49–45,0 мкм с максимальной прозрачностью 70 %. Отличие двух образцов наблюдается только в диапазоне до 25 мкм, где прозрачность керамики на 10–15 % ниже по сравнению с монокристаллическим образцом. В свою очередь образец, полученный из механической смеси, обладает низкой фотостойкостью, имеет высокую неоднородность структуры, что приводит к ухудшению прозрачности на 30–40 %.

Литература

1. Salimgareev D., Lvov A., Yuzhakova A., Shatunova D., Pestereva P., Yuzhakov I., Korsakov A., Zhukova L. Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0,25}\text{Br}_{0,75}\text{--AgI}$ system // Appl. Mater. Today. 2023. No. 32. P. 101809.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД, ОСНОВАННЫЙ НА ОБОБЩЕННОЙ ТЕОРЕМЕ ОБ ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ

Н. Д. Кундикова, Э. А. Бибикова, А. В. Кабанов

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
e-mail: aleksei_74_01@mail.ru

Аннотация. Предложен поляриметрический метод для измерения эффективных параметров поляризационной системы. Метод был экспериментально апробирован на многокомпонентных системах, состоящих из двулучепреломляющих пластинок и ЖК-ячеек.

Обобщенная теорема об эквивалентности поляризационных систем [1] гласит, что поляризационная среда или многокомпонентная система описывается шестью эффективными параметрами: линейной фазовой анизотропии Γ и α , линейной амплитудной анизотропии P и ϕ , циркулярной фазовой анизотропии θ , циркулярной амплитудной анизотропии R . В данной работе определялись параметры Γ , α , ϕ , P , R , θ системы из четырех двулучепреломляющих пластинок с различным направлением собственных осей. Каждая пластинка характеризовалась своим фазовым сдвигом и относительным амплитудным коэффициентом пропускания. Эффективные параметры системы были рассчитаны на основе формул, полученных в работе [2].

Суть предлагаемого метода экспериментального определения эффективных параметров заключается в измерении мощности линейно поляризованного света, прошедшего через исследуемую систему и анализатор, для различных комбинаций ориентации осей пропускания поляризатора и анализатора. Полученные данные использовались в разработанной программе, которая позволяла найти эффективные параметры системы (рис. 1).

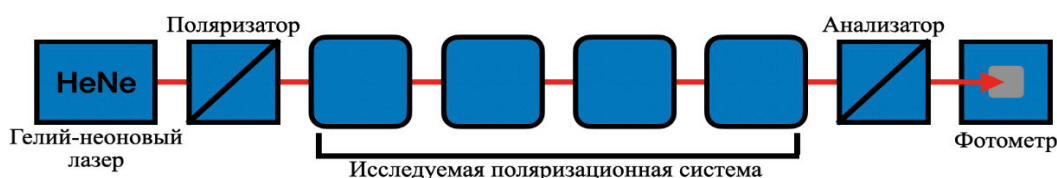


Рис. 1. Схема установки для определения эффективных параметров поляризационной системы

Сравнение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных параметров системы показало их соответствие, а значит, и работоспособность предлагаемого метода. Метод также был апробирован на трех- и двухкомпонентных системах, при этом в качестве составных элементов системы применялись как слюдяные пластинки, так и ЖК-ячейки.

Литература

1. Savenkov S.N., Marienko V.V., Oberemok E.A., Sydoruk O. Generalized matrix equivalence theorem for polarization theory // Physical Review E. 2006. No. 74(5). P. 056607.
2. Bibikova E.A., Kundikova N.D., Popkova A.M., Popkov I.I. Effective parameters of composed polarization systems // SPIE Proceedings. 2011. Vol. 8011. P. 80110U.

ОРГАНО-НЕОРГАНИЧЕСКИЕ СВЕТОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

С. К. Евстропьев¹, В. М. Волынкин¹, Д. В. Булыга¹, В. А. Островский²,
К. Н. Макаров², К. В. Дукельский¹, Г. С. Полищук¹

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² АО «Государственный научный центр Российской Федерации
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»
e-mail: dmbulyga@yandex.ru

Аннотация. В работе описаны синтез и исследование структуры и свойств органо-неорганических эпоксидных композитов, содержащих оксид меди CuO и магнетит Fe₃O₄ и поглощающих излучение в ближней инфракрасной области спектра.

Инфракрасные спектры поглощения, полученные в эксперименте, показывают, что введение оксидных частиц снижает степень отверждения эпоксидного полимера на 20–28 %. Fe₃O₄-содержащие композиты демонстрируют относительно низкое (до 4,2 %) отражение света в спектральном диапазоне 1000–1100 нм, что соответствует проведенным оценочным расчетам. При введении микропорошков CuO и Fe₃O₄ в состав эпоксидного полимера его микротвердость может быть увеличена от 120 до 160 МПа. На рис. 1 представлены спектры отражения полученных композитов. Наибольшим отражением в области спектра 1000–1100 нм (около 4,9 %) обладает образец композита, содержащий 8,3 масс. % оксида меди. Наименьшее значение отражения в данном диапазоне было получено для образца, содержащего 10 масс. % оксида железа Fe₃O₄.

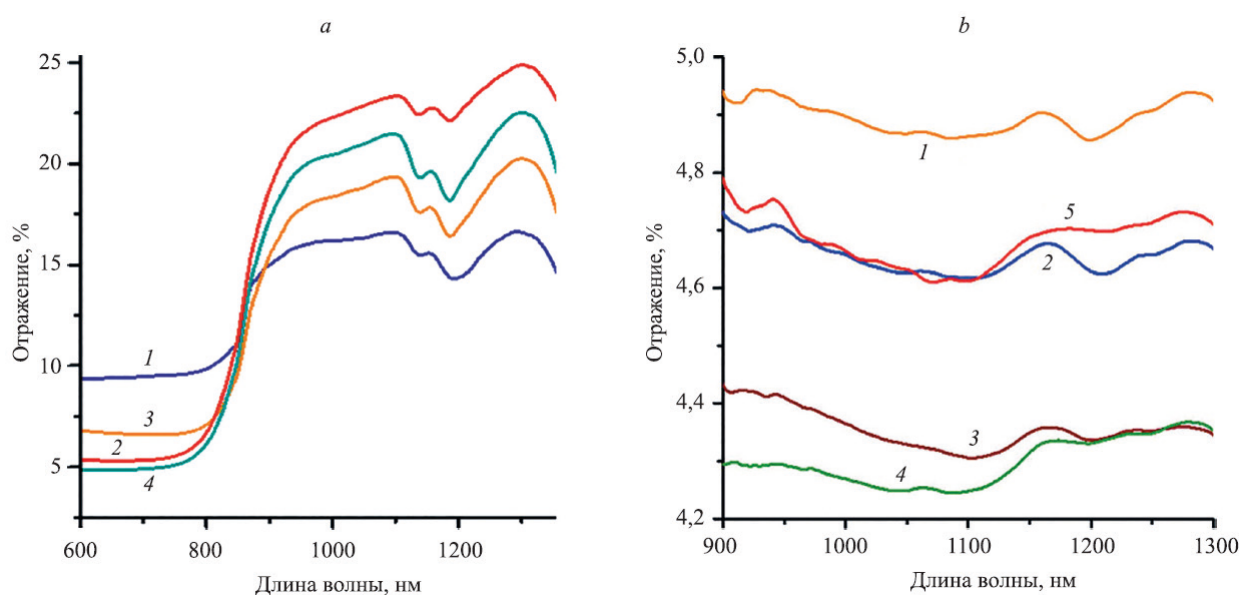


Рис. 1. Спектры отражения: а — CuO-содержащих композитов, масс. %:
3,2 (кривая 1); 8,3 (кривая 2); 25,0 (кривая 3); 44,4 (кривая 4);
б — Fe₃O₄-содержащих эпоксидных композитов, масс. %:
2,3 (кривая 1); 2,9 (кривая 2); 6,5 (кривая 3); 10,0 (кривая 4); 43,8 (кривая 5)

Полученные в работе экспериментальные результаты могут служить основой для разработки органо-неорганических композиционных материалов для лазерной техники, поглощающих излучение в ближней инфракрасной области спектра. Наиболее перспективны композиты, содержащие Fe₃O₄. Оптимальная концентрация оксида железа составляет около 10 масс. %.

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУЛЬФИДА И СЕЛЕНИДА МЫШЬЯКА*

А. Г. Березовский², Н. А. Добычин³, С. М. Дубровских², М. Н. Ивин²,
А. Н. Качемцев¹, А. А. Коновалов², Т. В. Котерева¹, А. С. Кустов²,
И. В. Скрипачев¹, Е. М. Чурбанов¹

¹ ФГБУН «Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН»

² ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина»

³ Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «Научно-исследовательский институт
измерительных систем им. Ю. Е. Седакова»
e-mail: kachemcev@ihps-nnov.ru

Аннотация. Доклад посвящен результатам экспериментального исследования влияния облучения образцов сульфида и селенида мышьяка различного химического состава гамма-квантами. Рассмотрено влияние уровня поглощенной дозы на спектр поглощения стекол в ИК-диапазоне, показатель поглощения, ЭПР- и рамановский спектры, определено влияние стехиометричности образцов на радиационную стойкость этих материалов.

Изучению влияния радиации на оптические, прочностные, электрические свойства широкозонных полупроводников типа сульфида или селенида мышьяка посвящено значительное количество работ, например [1]. Однако изменения в спектрах сульфида и селенида мышьяка во всем диапазоне среднего ИК практически не рассмотрены.

Образцы стекол были синтезированы из особоочищенных прекурсоров в Институте химии высокочистых веществ и представляли собой шайбы различной толщины и диаметра, размеры варьировали от 2 до 35 мм. Содержание мышьяка в стеклах изменяли от 36 до 42 процентов. Химический состав образцов и примесей в стеклах контролировали методом атомно-силовой спектроскопии. В качестве образца сравнения использовали селенид мышьяка марки ОСЧ 13-3. Измерения спектров поглощения сульфида и селенида мышьяка до и после облучения проводили в Институте химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых на ИК-Фурье-спектрометре высокого разрешения Tensor 27 фирмы Bruker.

Облучение проводили гамма-квантами от стационарного источника со средней энергией 1,25 МэВ. Мощность дозы излучения была одинакова для всех образцов, а уровень радиационного воздействия изменяли за счет времени экспозиции. Образцы стекла во время облучения находились в стеклянных ампулах, заполненных азотом, или просто на воздухе. По результатам дозиметрического сопровождения в двух сериях экспериментов уровень радиационного воздействия изменялся в диапазоне от 10 кГр до 10 МГр. В докладе приведены результаты измерений спектров поглощения в диапазоне от 8500 до 450 см⁻¹, спектров комбинационного рассеяния 900...100 см⁻¹, ЭПР и показателя преломления для образцов различного химического состава в зависимости от уровней радиационного воздействия.

Литература

1. Матковский А. О., Шварц К. К., Пирогов Ф. В., Шпотюк О. И., Савицкий И. В. Радиационные и фотостимулированные процессы в стеклообразном трисульфиде и триселениде мышьяка [Препринт ЛАФИ-142]. Институт физики, Академия наук Латвийской ССР. Саласпилс, 1988.

* Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 22-13-00226.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДАМИ ЭПР И ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ФОТОГЕНЕРАЦИИ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА КОМПОЗИТАМИ СИСТЕМЫ $\text{ZnO—SnO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3^*$

Л. Л. Хомутичкина¹, И. К. Мешковский¹, И. В. Москаленко¹,
Е. В. Скорб¹, И. В. Багров², С. К. Евстропьев^{1, 2, 3}

¹ Университет ИТМО

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)
e-mail: larahlesnyh@yandex.ru

Аннотация. В данной работе исследована фотогенерация синглетного кислорода композитами системы $\text{ZnO—SnO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3$, полученными полимерно-солевым методом синтеза. Были измерены спектры отражения композитов и на основании полученных данных была проведена оценка ширины запрещенной зоны в материалах.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке фотокаталитических и бактерицидных оксидных материалов для систем очистки воздуха и водных сред от токсичных органических соединений и болезнетворных микроорганизмов.

Экспериментальные исследования проводились на образцах системы $\text{ZnO—SnO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3$, приготовленных согласно методике, описанной в [1, 2]. В качестве исходных материалов были использованы водные растворы $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$, SnCl_2 , FeCl_3 и поливинилпирролидона. После смешения растворов смесь подвергалась сушке и последующей термообработке при 550 °С в течение 2 часов.

Химический состав, кристаллическая структура и морфология полученных порошков были исследованы методами рентгенофазового, электронно-микроскопического и энергодисперсионного анализов. Установлено, что порошки состоят из оксидных нанокристаллов, размеры которых не превышают 50 нм.

Спектры отражения композитов были измерены на приборе Perkin Elmer 900 UV/VIS/NIR, на основании полученных данных была проведена оценка ширины запрещенной зоны в материалах.

Для изучения процессов фотогенерации синглетного кислорода в качестве источников возбуждающего излучения использовались светодиоды с $\lambda_{\text{max}} = 375$ нм и $\lambda_{\text{max}} = 405$ нм. Исследование процессов фотогенерации синглетного кислорода методом ЭПР спектроскопии выполнялось при комнатной температуре, применялся спектрометр SPINSCAN X (Республика Беларусь). Для детектирования синглетного кислорода ЭПР методом использовались добавки 4-окси-2,2,6,6-тетраметил-1-пиперидина (4-окси ТЕМПО). Изучение процессов фотогенерации синглетного кислорода методом люминесцентной спектроскопии в ближней ИК-области спектра проводилось с помощью спектрометра SDH-IV (SOLAR Laser Systems, Республика Беларусь).

Установлено, что интенсивность фотогенерации синглетного кислорода синтезированными системами линейно увеличивается с ростом интенсивности возбуждающего излучения. Показано, что небольшие (2÷3 масс. %) добавки SnO_2 и Fe_2O_3 к оксиду цинка значительно (более чем в 2 раза) усиливают фотогенерацию синглетного кислорода.

* Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00559).

Литература

1. Дукельский К. В., Евстропьев С. К. Формирование защитных наноразмерных покрытий на основе Al_2O_3 ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{—AlF}_3$) на поверхности стекла // Оптический журнал. 2011. № 78(2). С. 71–81.
2. Khomutinnikova L., Evstropiev S., Meshkovskii I., Bagrov I., Kiselev V. Ceramic $\text{ZnO-SnO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3$ powders and coatings — effective photogenerators of reactive oxygen species // Ceramics. 2023. No. 6. P. 886–897.

ВЛИЯНИЕ СВЧ-ОБРАБОТКИ НА ВРЕМЯ СИНТЕЗА И РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИНКСУЛЬФИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ

М. А. Швиндин^{1, 2}, Е. В. Зеленина¹, В. В. Бахметьев²

¹ АО «Радиевый институт им. В. Г. Хлопина»

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)
e-mail: shvindin2012@yandex.ru

Аннотация. В ходе работы было изучено влияние СВЧ-обработки шихты как альтернатива стандартному высокотемпературному синтезу цинксulfидных радиолуминофоров. Показана перспективность такого метода обработки в целях значительного уменьшения времени синтеза люминофоров и дальнейшего улучшения их яркости и интенсивности радиолуминесценции при возбуждении β -излучением трития.

Твердотельные радиолуминесцентные источники света на основе трития благодаря своей безопасности, компактности и энергоэффективности могут заменить применяющиеся в настоящий момент газонаполненные трубки. Одним из способов улучшения их яркостно-спектральных характеристик является использование энергетического воздействия на кристаллическую структуру люминофора, такое как электронно-лучевое или же воздействие ЭМ-полем СВЧ-диапазона [1]. Эти методы способствуют образованию новых точечных дефектов в виде вакансий, стимулируют диффузию активатора и соактиватора вглубь решетки основы, а также способствуют изменению фазового состава после обработки, что приводит к увеличению центров люминесценции.

В ходе работы были приготовлены 2 шихты люминофора на основе ZnS: Cu, Br с концентрациями меди в шихте 0,005 % и 0,01 %. Стандартная стадия высокотемпературного синтеза в муфельной печи ($t = 3$ часа, $T = 900$ °C), необходимая для внедрения активатора и соактиватора в решетку ZnS и образования центров свечения, была заменена на СВЧ-обработку в микроволновом стенде с частотой магнетрона 2,4 ГГц. Время обработки шихты составило 5 минут при температуре 650 °C. Для всех образцов были измерены яркости и спектры радиолуминесценции на твердотельном тритиевом источнике в виде TiT с активностью 0,4 Ки.

Согласно полученным данным, наибольшую яркость радиолуминесценции демонстрирует образец с концентрацией меди в шихте 0,005 %. Прирост яркости составил 56 % по сравнению с образцом, содержащим медь в количестве 0,01 %. На спектрах радиолуминесценции для всех люминофоров наблюдаются две полосы свечения («синяя» и «зеленая») с максимумами интенсивности на 440 и 505 нм соответственно, которые могут быть такими центрами свечения, как ассоциаты иона меди в узле цинка с ионом меди в междоузлии ($\text{Cu}_{\text{Zn}}'\text{Cu}_i^\bullet$) и иона меди в узле цинка с вакансией серы ($\text{Cu}_{\text{Zn}}'\text{V}_\text{S}^\bullet$). После СВЧ-обработки шихты происходит смещение основных пиков в коротковолновую область по сравнению со стандартным синтезом в муфельной печи, а также возрастание интенсивности на длине волны 440 нм.

Литература

1. Швиндин М. А., Бахметьев В. В., Зеленина Е. В. Влияние СВЧ-обработки на яркостно-спектральные свойства и фазовый состав цинксulfидных радиолуминофоров // Наука настоящего и будущего: материалы XII научно-практической конференции с международным участием для студентов, аспирантов и молодых ученых, 16–18 мая 2024 г. СПб, 2024. Т. 1. С. 251–254.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОРЕФРАКТИВНЫХ ГОЛОГРАММ В ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ МЕДЬЮ КРИСТАЛЛЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

Р. И. Анисимов, А. А. Колмаков, Э. Комов, С. М. Шандаров

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
e-mail: roman.anisimov.00@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования процесса релаксации фоторефрактивных голограмм для диффузионно-легированного медью кристалла ниобата лития. Из экспоненциальной аппроксимации релаксационной зависимости дифракционной эффективности голограммы оценена эффективная проводимость структуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$.

Кристаллы ниобата лития, легированные примесями Fe и Cu, позволяют реализовать в них фотовольтаический механизм формирования фоторефрактивных голограмм. Сильные эванесцентные электрические поля этих голограмм существуют и над поверхностью образцов $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ и $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$, обеспечивая агрегацию нанесенных на них нано- и микрочастиц; при этом легирование может быть реализовано термодиффузией [1]. В докладе представлены результаты исследования релаксации фоторефрактивных голограмм в диффузионно-легированной пластине $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ X-среза.

Легирование осуществлялось из металлических пленок меди толщиной 800 нм, нанесенных на обе YZ-границы кристалла, в атмосфере аргона при температуре 700 °C в течение 12 часов. На рис. 1 точками представлена временная зависимость для дифракционной эффективности фоторефрактивной голограммы с пространственным периодом 10 мкм, записываемой интерференционной картиной двух лазерных пучков с длиной волны 532 нм, контрастом $m \approx 0,98$ в течение времени $t_w = 300$ с и считываемой в режиме Брэгга зондирующим пучком с $\lambda = 650$ нм в интервале от 0 до 2500 с. После выключения записывающих пучков при $t = t_w$ начиналась медленная релаксация дифракционной эффективности, удовлетворительно описываемая экспоненциальной функцией с постоянной времени $\tau_r = 4300$ с (см. сплошную кривую на рис. 1).

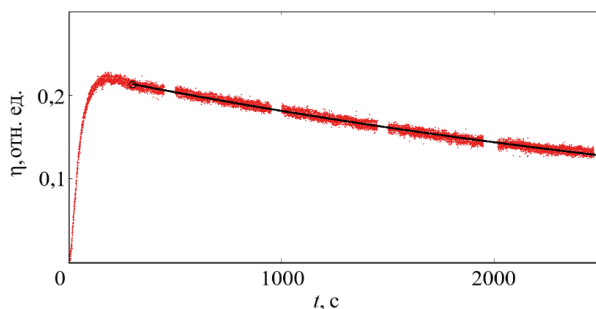


Рис. 1. Временная зависимость дифракционной эффективности голограммы

Из известного выражения для времени релаксации τ_r , имеющей максвелловский характер, величина эффективной проводимости исследуемой диффузионной структуры $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ вдоль полярной оси может быть оценена как $\sigma_{\text{эфф}} = 5,77 \cdot 10^{-14} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$.

Литература

1. Мамбетова К. М., Шандаров С. М., Татьянников А. И., Смирнов С. В. Агрегирование диэлектрических наночастиц на X-срезе кристалла $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ электрическими полями фоторефрактивных голограмм // Известия вузов. Физика. 2019. № 62(4). С. 89–93.

ИССЛЕДОВАНИЯ ФТОРИДА ЛАНТАНА КАК ЛЮМИНОФОРА ДЛЯ РЕНТГЕНОФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

В. В. Бахметьев, Г. Ф. Янг

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
e-mail: vadim_bakhmetyev@mail.ru

Аннотация. В данном докладе рассматривается применение методики рентгенофотодинамической терапии (РФДТ) для лечения заболеваний. В частности, один из вариантов ее реализации предусматривает использование двухкомпонентной системы «рентгенолюминофор — фотосенсибилизатор». Чтобы повысить эффективность РФДТ, в данной работе предлагается заменить двухкомпонентную систему на однокомпонентную и перейти от двухстадийного процесса к одностадийному, для чего предлагается использовать нанлюминофор, испускающий ультрафиолет под действием рентгеновского излучения.

В современной медицине развивается перспективная методика рентгенофотодинамической терапии (РФДТ) для лечения онкологических и других видов заболеваний. Одним из вариантов ее реализации является использование двухкомпонентной системы «рентгенолюминофор — фотосенсибилизатор», вводимой в организм. Первый компонент системы конвертирует рентгеновское излучение медицинского аппарата в видимый свет, а второй под действием света генерирует активный кислород, уничтожающий опухолевые клетки [1]. Чтобы повысить эффективность РФДТ, предлагается заменить двухкомпонентную систему на однокомпонентную и перейти от двухстадийного процесса к одностадийному. Для этой цели в качестве рентгеноенсибилизатора предлагается использовать нанлюминофор, испускающий ультрафиолет под действием рентгеновского излучения. В этом случае активный кислород генерируется под действием ультрафиолетового излучения и фотосенсибилизатор не требуется.

Люминофор $\text{LaF}_3:\text{Ce}$ обладает люминесценцией в ультрафиолетовой области спектра. Для синтеза люминофора состава $\text{LaF}_3:\text{Ce}$ с наноразмерными частицами, пригодного для введения в организм, нами был использован гидротермальный метод. Была проведена оптимизация концентрации активатора и найден состав люминофора, обладающего максимальной интенсивностью люминесценции. Рентгенофазовый анализ показал, что синтезированные образцы имеют фазовый состав, соответствующий GdF_3 (карточка PDF 32-0483). Как видно из рис. 1, максимум в спектре излучения наиболее интенсивного образца лежит в ультрафиолетовой области и имеет длину волны 288 нм. По данным растровой электронной микроскопии (рис. 2), размер частиц данного образца не превышает 100 нм. Таким образом, по своим спектральным и дисперсным характеристикам синтезированный нанлюминофор подходит для использования в РФДТ.

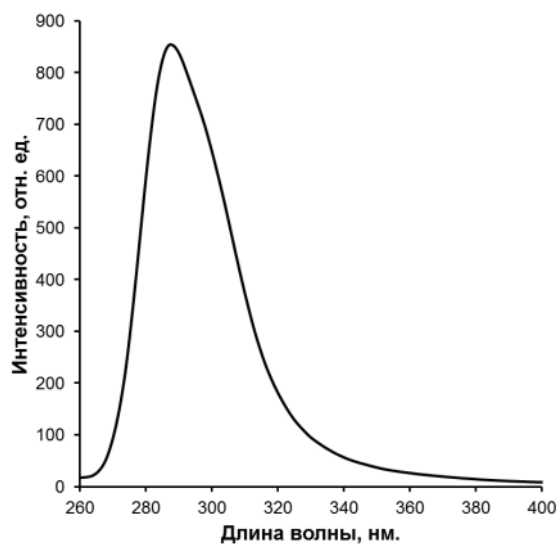


Рис. 1. Спектр излучения
нанолуминофора $\text{LaF}_3\text{:Ce}$

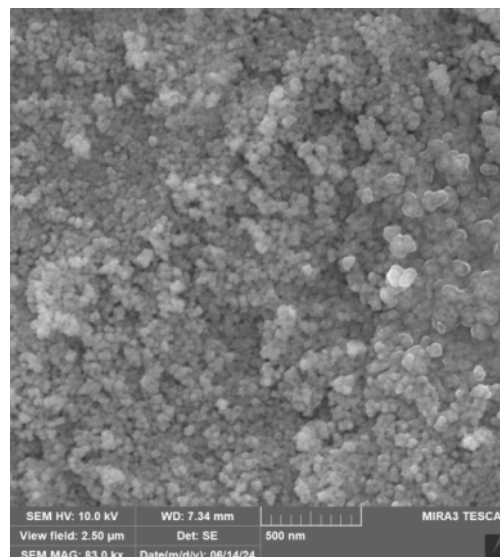


Рис. 2. Электронная микрофотография
нанолуминофора $\text{LaF}_3\text{:Ce}$

Литература

1. *Ustabaev P.Sh., Zyкова P.D., Bakhmetev V.V., Leonova E.I.* Research and optimization of the synthesis of $\text{GdF}_3\text{:Tb}$ X-ray phosphors for X-ray photodynamic therapy // Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 2024. No. 50. P.522–529.

ИЗУЧЕНИЕ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ЭФФЕКТА ИНТЕНСИВНОСТИ РАДИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В КОМПОЗИТНОЙ СТРУКТУРЕ ЦИНКОСУЛЬФИДНЫХ ЛЮМИНОФОРОВ

Е. В. Зеленина^{1, 2}, А. В. Чуркина¹, И. В. Снятков¹, М. М. Сычев¹

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт

² АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина»

e-mail: elena.v.zelenina@gmail.com

Аннотация. Исследована перколяционная динамика изменения интенсивности радиолюминесценции в диапазоне соотношений фаз в композитной структуре люминофоров ZnS : Cu,Br.

Для пяти независимых серий люминофоров ZnS:Cu,Br, синтезированных из разного сырья в разных условиях, обнаружен перколяционный эффект увеличения интенсивности радиолюминесценции при определенном соотношении фаз в люминофорах. Исследование микроструктуры подтвердило образование двухфазной структуры в зернах люминофора, что позволило предположить формирование непрерывного вюрцитного кластера в зерне люминофора с протяженной межфазной границей вюрцит-сфалерит, что способствует увеличению скорости зернограницной диффузии активирующих примесных ионов и образованию центров свечения $\text{Cu}'_{\text{Zn}}\text{-Br}_\text{S}^\bullet$, что приводит к скачкообразному росту интенсивности радиолюминесценции.

С применением формул теории перколяции [1] $I = f(w)$ полученные зависимости были аппроксимированы с R^2 от 0,9 до 0,98 (рис. 1), что говорит об адекватности примененного подхода. Порог перколяции наблюдается при содержании вюрцитной фазы 22–33 %, а интервал насыщения (максимальных значений интенсивности) лежит в пределах содержания вюрцита 30–60 %.

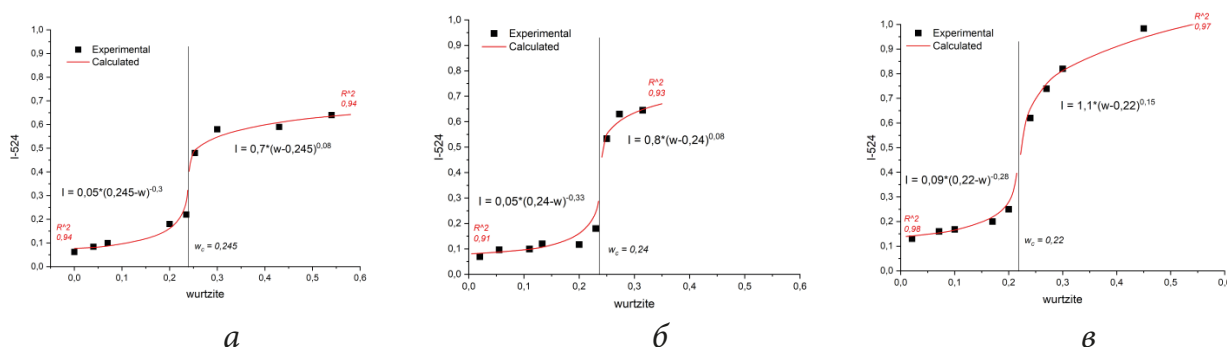


Рис. 1. Аппроксимация $I = f(w)$ по уравнениям теории перколяции для трех серий радиолюминофоров

Для количественного анализа влияния содержания вюрцита в зерне люминофора на эффективные коэффициенты диффузии активирующих примесных ионов было проведено моделирование зависимости D_{eff} от содержания вюрцитной фазы для различных отношений коэффициентов диффузии по межфазной границе к коэффициентам диффузии в объеме монофазы, продемонстрировавшее комплексную физическую природу взаимосвязи структурно-фазовых и электрооптических свойств радиолюминофоров.

Литература

1. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed. London: Taylor and Francis, 2003.

СДВИГ ЧАСТОТЫ ЛИНИИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ МЕТАСТАБИЛЬНЫХ АТОМОВ ГЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В. А. Картошкин, А. И. Окуневич

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
e-mail: victor.kart@mail.ioffe.ru

Аннотация. В работе рассматривается влияние одновременно протекающих упругого и неупругого процессов на сдвиг частоты линии магнитного резонанса оптически ориентированных метастабильных атомов изотопа гелия-4.

Как было показано в [1], одновременное протекание упругого и неупругого процессов существенно влияет на сечение спинового обмена (упругий процесс). Как известно, процесс спинового обмена приводит к сдвигу частоты магнитного резонанса сталкивающихся атомов. Подобного рода ситуация исследовалась, в частности, в [2], когда в столкновении участвовали щелочные атомы, обладающие спином $S = 1/2$.

В представленной работе рассматривается взаимодействие двух метастабильных поляризованных атомов гелия, обладающих спином $S = 1$. При столкновении двух таких атомов возможны как спиновый обмен, так и ионизация партнера столкновения за счет внутренней энергии сталкивающихся атомов.

Получены выражения для сечений сдвигов частоты, которые определяются интерференцией амплитуд упругого рассеяния на синглетном и триплетном термах квазимолекулы, на синглетном и квинтетном термах, а также на триплетном и квинтетном термах.

На основании комплексных потенциалов взаимодействия квазимолекулы He_2^* были рассчитаны фазы рассеяния на соответствующих термах и на их основе проведен расчет температурных зависимостей соответствующих сечений.

Расчеты проводились для следующих пар атомов изотопов гелия: гелий-3 — гелий-3; гелий-3 — гелий-4; гелий-4 — гелий-4.

Для случая столкновений с участием изотопа гелий-3 наблюдаются все три сечения сдвига, в то время как при столкновении атомов изотопа гелий-4 между собой — только сечение сдвига, которое определяется интерференцией амплитуд на синглетном и квинтетном терме. Это связано с тем, что метастабильные атомы гелия-4 неразличимы между собой, так как в отличие от изотопа гелий-3 не обладают ядерным спином.

Литература

1. *Kartoshkin V.A.* Angular Momentum Transfer at the Chemo-ionization and Spin Ex-change Processes. Interaction between Spin Polarized Metastable Helium Atoms // *Mediterran. J. Chem.* 2022. Vol. 12. No. 2. P. 164–174.
2. *Kartoshkin V.A.* The Interaction between Spin Polarized Alkali Atoms: Shifts of the Magnetic Resonance Lines // *Alkali Metals: New Re-Search.* (New York, USA): Nova Science Publishers, inc., 2023. P. 1–32. ISBN: 979-8-88697-706-6.

СДВИГИ ЧАСТОТЫ ЛИНИИ МАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ОПТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЩЕЛОЧНЫХ АТОМОВ В УСЛОВИЯХ ОПТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ

В. А. Картошкин

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
e-mail: victor.kart@mail.ioffe.ru

Аннотация. В работе рассматриваются столкновения спин поляризованных щелочных атомов и влияние этих столкновений на сдвиг частоты линии магнитного резонанса этих атомов. Показано, что в зависимости от сорта сталкивающихся атомов температурная зависимость сдвига частоты может проходить через ноль.

Как известно, спин-обменные столкновения между щелочными атомами играют важную роль в приборах квантовой электроники с оптической ориентацией атомов — квантовых магнитометрах, стандартах частоты и времени. При столкновении наряду с переносом поляризации между сталкивающимися частицами [1] имеет место также процесс спинового обмена (обмен электронной поляризацией между сталкивающимися атомами) [2], что приводит к сдвигу частоты линии магнитного резонанса этих атомов.

В работе проводится расчет температурных зависимостей величин сдвигов частоты линии магнитного резонанса для различных пар щелочных атомов. В рассматриваемой ситуации некоторые из щелочных атомов подвергались оптической ориентации. В процессе столкновения с неполяризованными атомами другого сорта или с одинаковыми атомами имел место сдвиг частоты линии магнитного резонанса, зависящий от мнимой части комплексного сечения спинового обмена, а также от степени поляризации оптически ориентированных атомов. Расчет комплексных сечений спинового обмена проводился на основании потенциалов взаимодействия, описывающих синглетное и триплетное состояния димера щелочного металла, образующегося при столкновении.

В работе показано, что в зависимости от сорта сталкивающихся атомов щелочного металла, находящихся в рабочей камере, температурные зависимости для двух сверхтонких состояний щелочного атома могут иметь одинаковый знак, разный знак или проходить через ноль при определенных температурах в рабочей камере.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности подбора таких рабочих условий, при которых сдвиг частоты, обусловленный спиновым обменом, либо минимален по величине, либо вообще равен нулю.

Используя полученные в работе выражения для сечения сдвига и данные по комплексным потенциалам взаимодействия этих атомов, были рассчитаны температурные зависимости сдвига частоты магнитного резонанса атомов.

Литература

1. *Kartoshkin V.A.* Angular Momentum Transfer at the Chemo-ionization and Spin Ex-change Processes. Interaction between Spin Polarized Metastable Helium Atoms // *Mediterran. J. Chem.* 2022. Vol. 12. No. 2. P. 164–174.
2. *Kartoshkin V.A.* The Interaction between Spin Polarized Cesium Atoms and Alkali Atoms: Spin Exchange Collisions // *Alkali Metals: New Research.* (New York, USA): Nova Science Publishers, inc., 2023. P. 59–80. ISBN: 979-8-88697-706-6.

ЛЕТУЧЕСТЬ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ СПЛАВОВ

М. Э. Самигуллин^{1, 2}, М. Д. Михайлов^{1, 2}, А. В. Белых², М. А. Ременный³

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ ООО «ИоффелеД»

e-mail: samigullin18@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования летучести и кристаллизации эвтектических составов халькогенидных стекол, пригодных для прессования готовых оптических элементов методом прецизионного прессования, работающих в диапазоне длин волн 2–12 мкм.

Среди неорганических стекол всех классов только халькогенидные стекла прозрачны в диапазоне длин волн от 8 до 12 мкм (третье атмосферное окно). Достоинства халькогенидных стекол как материалов для инфракрасной оптики — высокая прозрачность, потенциально низкие оптические потери в средней ИК-области, низкая энергия фотонов, низкая склонность к кристаллизации стекол некоторых составов и их легкоплавкость. Это позволяет изготавливать из стекол готовые оптические элементы (линзы, призмы) методом прецизионного прессования.

Проблемами при прессовании оптических элементов из халькогенидных стекол являются возможность кристаллизации заготовки и летучесть его компонентов.

Составы стекол, наиболее устойчивые к кристаллизации, часто близки к эвтектическими составам. Устойчивы к кристаллизации также некоторые соединения, образующиеся при взаимодействии компонентов [1].

Нами были выбраны по диаграмме состояния стекла, близкие к эвтектическим составам, в системах As—Se (концентрация As 20 мол. %), Ge—Sb—Se (ЭЗ), As—Ge—Se (концентрация As 13 мол. %) и наиболее тугоплавкое селенидное стекло ИКС34. Результаты по прессованию стекол при вязкости 10^6 – 10^8 Па·с в атмосфере воздуха показали, что все они устойчивы кристаллизации. Для исследования на летучесть компонентов стекло в виде порошка помещалось в кварцевую ампулу. Вакуумированную ампулу помещали под углом 45° в печь, нагретую до температуры, соответствующей вязкости 10^3 – 10^4 Па·с. На рис. 1 представлены ампулы после прогрева. Видно, что стекло марки ИКС34 летуче, в отличие от стекла системы Ge—Sb—Se (ЭЗ).

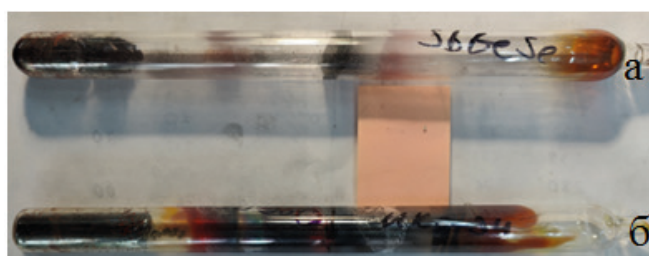


Рис. 1. Ампулы после эксперимента по летучести:
а) Ge—Sb—Se (ЭЗ); б) ИКС34

Экспериментально подтверждено, что исследуемые составы, за исключением стекла ИКС34, нелетучи, устойчивы к кристаллизации и пригодны для прецизионного прессования.

Литература

1. Орлова Г.М., Мартынова Н.С., Хоменко А.В. Расчетное и экспериментальное определения эвтектической точки системы $\text{GeSe-Sb}_2\text{Se}_3\text{-GeSe}_2$ // Журнал Неорганической Химии. 1982. Т.27. № 2. С.485–490.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ ИЗ ФТОРИСТОГО МАГНИЯ

А. А. Дунаев¹, В. Н. Егоров², А. А. Луковникова²,
Е. К. Прокопьева², Е. Ю. Токарева²

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² Восточно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»
e-mail: dunaev@goi.ru

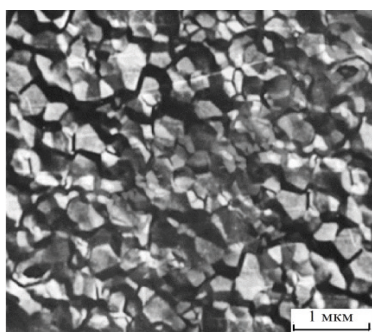
Аннотация. Выбран оптический материал для исследования диэлектрических свойств поликристаллического фторида магния (MgF_2), представлены его физико-химические свойства. Измерены относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) образцов.

Существует потребность в измерениях диэлектрических параметров материалов в различных областях промышленности. Для проверки и калибровки средств измерений ϵ и $\text{tg}\delta$ предназначены специальные рабочие эталоны — меры диэлектрических параметров (меры ДП). Меры реализуются как образцы диэлектриков с различной диэлектрической проницаемостью в форме дисков, подложек и стержней. Каждый диэлектрический образец аттестуется по параметрам ϵ , $\text{tg}\delta$ индивидуально и лишь после этого становится мерой ДП.

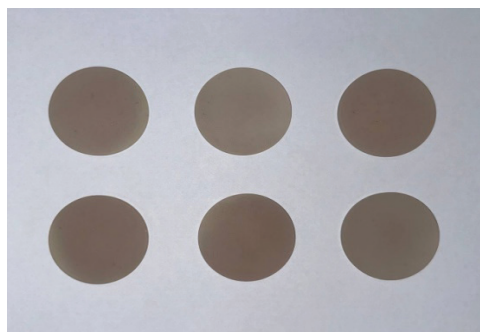
Важной является область значений ϵ в диапазоне 4...9, где желательно иметь несколько значений, в частности, вблизи $\epsilon \approx 5$. Подходящим материалом является оптическая керамика (ОК) из фтористого магния, которая обладает малыми диэлектрическими потерями, имеет достаточную механическую прочность, слабую температурную зависимость, изотропна, однородна по объему и стабильна во времени.

Керамика представляет собой поликристаллический материал, получаемый вакуумным прессованием порошка при одноосном давлении до $1,5 \text{ т/см}^2$ и температуре 650°C . При прессовании происходит уплотнение материала, в первую очередь, за счет протекания рекристаллизационных процессов. При этом достигается плотность более 99,7 % и материал становится прозрачным в оптическом диапазоне спектра (3...5 мкм). Средний размер зерен-кристаллитов находится в интервале 0,5...1 мкм (рис. 1а). Преимущественное применение керамики — оптическая промышленность. Ее теплофизические и механические характеристики [1]: теплопроводность — $14,65 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, удельная теплоемкость — $1,0551 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$, микротвердость — $730 \cdot 10^7 \text{ Па}$. Материал не растворяется в воде, кислотах, органических растворителях.

Шлифованные образцы для измерений: $\varnothing 50 \times 2,5 \text{ мм}$ — 3 шт. и $\varnothing 50 \times 3 \text{ мм}$ — 3 шт. Вид образцов представлен на рис. 1б.



а



б

Рис. 1. Микроструктура оптической керамики из фтористого магния (а), вид образцов (б)

Диэлектрические параметры образцов измерялись методом объемного резонатора [2] на аппаратуре государственного первичного эталона ГЭТ 110-2023. Результаты измерения толщины t , резонансной частоты $f_{\text{е}}$, собственной добротности $Q_{\text{е}}$ и расчета диэлектрических параметров ϵ и $\text{tg}\delta$ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Диэлектрические параметры оптической керамики

$t, \text{мм}$	$f_{\text{е}}$	$Q_{\text{е}}$	ϵ	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	$t, \text{мм}$	$f_{\text{е}}$	$Q_{\text{е}}$	ϵ	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$
2,506	6,135007	9 570	5,297	1,3	2,972	5,911890	8 960	5,301	1,3
	9,403385	28 980	5,301	1,7		7,915304	27 170	5,296	1,4
	11,33051	34 240	5,309	1,6		9,383497	30 250	5,305	1,5
2,499	6,139363	10 050	5,294	1,2	3,001	5,900175	8 840	5,298	1,3
	9,403976	29 730	5,297	1,5		7,914672	27 130	5,293	1,5
	11,33112	34 530	5,303	1,5		9,382662	30 190	5,304	1,6
2,500	6,138278	9 790	5,296	1,3	2,995	5,901287	9 240	5,302	1,2
	9,403784	29 700	5,300	1,5		7,914766	27 390	5,295	1,4
	11,33087	34 710	5,307	1,5		9,382800	30 670	5,304	1,4

Полученные результаты показывают хорошую воспроизводимость диэлектрических параметров образцов оптической керамики из фтористого магния и будут использованы в испытаниях с целью утверждения типа средства измерения (СИ) — мер ДП. По итогам проведения испытаний меры ДП будут внесены в Госреестр СИ, что позволит удовлетворить запросы предприятий-заказчиков на поверенные средства измерений.

Литература

1. Оптические кристаллические материалы. Каталог / под ред. Г.Т.Петровского. Л., 1991. 51 с.
2. ГОСТ Р 8.623-2015. Относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков. Методики измерений в диапазоне сверхвысоких частот. М.: Стандартиформ, 2016. 35 с.

СТЕКЛА С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ ХАЛЬКОГЕНИДОВ СВИНЦА ДЛЯ ЗАДАЧ ФОТОНИКИ

А. А. Онущенко¹, И. Д. Авдеев²

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² ФТИ им. А. Ф. Иоффе

e-mail: alarkon@goi.ru

Аннотация. Обсуждаются вопросы повышения эффективности насыщающихся поглотителей из неорганических стекол с квантовыми точками PbS, предназначенных для пассивной модуляции добротности твердотельных лазеров ближнего ИК-диапазона. Обозначен новый подход, в котором используются данные атомистических расчетов сечений межзонного и внутризонного поглощения света в квантовых точках (КТ).

Возможность получения наносекундных лазерных импульсов при использовании образцов неорганического стекла с КТ сульфида свинца в качестве внутривибрационных насыщающихся поглотителей была продемонстрирована для широкого набора твердотельных лазеров с рабочей длиной волны до 2,1 мкм [1, 2].

Высокая лучевая и механическая прочность, наряду с долговременной стабильностью свойств, является очевидным преимуществом таких пассивных затворов при получении мощных наносекундных импульсов. В то же время по отношению к представленным на рынке кристаллическим модуляторам добротности (различные кристаллы с ионами переходных металлов) явным преимуществом стекол с КТ может оказаться возможность прецизионной подстройки полосы поглощения изготавливаемого насыщающегося поглотителя к рабочей длине волны лазера, которая осуществляется просто путем изменения размера КТ, выращиваемых в процессе термообработки исходного стекла.

Одним из важнейших факторов, определяющих эффективность пассивных модуляторов добротности, является уровень остаточного (ненасыщаемого) поглощения, от которого, в свою очередь, зависит контраст пассивного затвора. Неустранимое остаточное поглощение связано с наличием и возможностью оптических переходов с возбужденного состояния КТ, обусловленных в данном случае внутризонными переходами между размерно-квантованными уровнями электронов и дырок в КТ. При этом отношение сечений межзонного и внутризонного поглощения может иметь ярко выраженную спектральную зависимость.

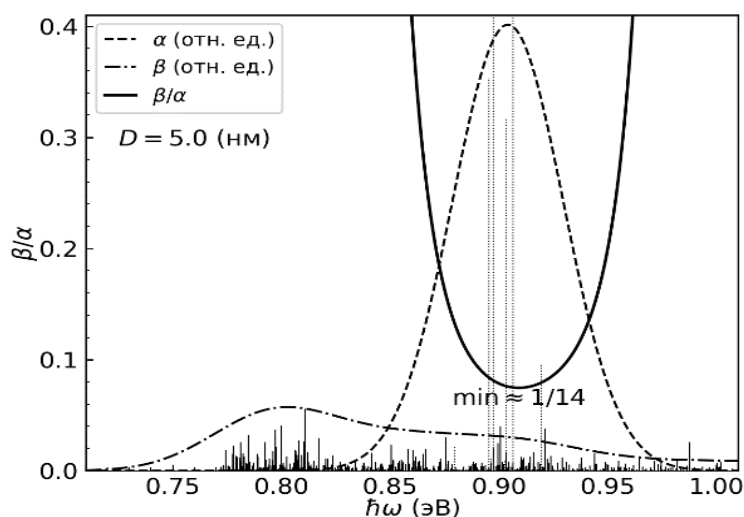


Рис. 1. Межзонные и внутризонные оптические переходы

В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены межзонные (интенсивные пунктирные вертикальные линии) и внутризонные («частокол» сплошных линий) оптические переходы, полученные в результате расчетов атомистическим методом сильной связи для КТ PbS диаметром 5,0 нм в области их края фундаментального поглощения 0,9 эВ (≈ 1380 нм).

В расчете методом сильной связи учитываются прямые межзонные оптические переходы с учетом экситонного эффекта, а также прямые оптические внутризонные переходы между электронными (дырочными) состояниями. Непрерывные оптические спектры в расчете моделируются как сумма дискретных пиков, соответствующих переходам между дискретными уровнями КТ, усредненные с гауссовым распределением с полушириной 25 мэВ. Спектральные зависимости межзонного (α) и внутризонного (β) поглощения показаны штриховой и штрих-пунктирной огибающей соответственно. Спектр отношения β/α приведен сплошной кривой.

Из результатов проведенного расчета следует, что максимальное отношение сечений межзонного и внутризонного поглощения достигает значений порядка 14 в области максимума линии поглощения, обусловленной межзонными переходами. Такое значение отношения сечений поглощения с основного и возбужденного состояния вполне приемлемо для получения эффективного пассивного затвора с высоким контрастом.

Отметим, что приведенные результаты были получены в рамках упрощенной модели. Более аккуратные атомистические расчеты требуют учета особенностей зонной структуры PbS в широком диапазоне энергий. Сульфид свинца является прямозонным многодолинным полупроводником, потолок валентной зоны и дно зоны проводимости которого расположены в четырех L долинах. И если вблизи точки экстремума в L долине дисперсия зон может быть достаточно хорошо описана в рамках двухзонной kp модели, то на больших энергиях существенным становится учет непараболичности зон и второго локального экстремума вблизи Σ долины. Попадание в область энергий Σ долины существенно увеличивает конечную плотность состояний в квантовой точке и требует расчета очень большого количества электронных и дырочных состояний для аккуратного учета всех возможных оптических переходов в заданную область спектра. При этом анализ конкретных оптических переходов также затруднен в силу возможности междолинного рассеяния не только между L долинами, но и между состояниями Σ долины.

Таким образом, теоретический расчет и анализ внутризонных оптических переходов в КТ PbS является хотя и сложной, но актуальной задачей, решение которой позволяет прогнозировать эффективность обсуждаемых пассивных затворов, не прибегая к трудоемким нелинейно-оптическим измерениям спектральных зависимостей остаточного поглощения для большого массива образцов, отличающихся структурными параметрами (средний размер, дисперсия по размерам и пр.), выращиваемых в объеме стекла кристаллических частиц.

Литература

1. Malyarevich A. M., Yumashev K. V., Lipovskii A. A. Semiconductor-doped glass saturable absorbers for near-infrared solid state lasers // J. Appl. Phys. 2008. No. 103. P.081301-1–081301-25.
2. Loiko P., Serres J.M., Mateos X., Yumashev K., Malyarevich A., Onushchenko A., Petrov V., Griebner U., Aguiló M., Díaz F. Ho:KLu(WO₄)₂ microchip laser Q-switched by a PbS quantum-dot-doped glass // IEEE Photonics Technology Letters. 2015. No. 27. P. 1795–1798.

ВЛИЯНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ТИТАНСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЛИТИЕВОАЛЮМОСИЛИКАТНОЙ СИСТЕМЫ

*С. С. Мальцев¹, О. С. Дымшиц², И. П. Алексеева²,
С. С. Запалова², А. А. Жилин³*

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова»

e-mail: riplgandeleon@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние окислительно-восстановительных условий синтеза на структуру и свойства титансодержащих стеклокристаллических материалов литиевоалюмосиликатной системы с близким к нулю коэффициентом термического расширения. Полученные результаты важны для создания материалов фотоники с ионами переходных металлов переменной валентности.

Модельные стекла литиевоалюмосиликатной системы, нуклеированные диоксидом титана, синтезированы в нормальных и окислительных условиях в лабораторной электрической печи при температуре 1600 °С с перемешиванием в тигле объемом 400 мл. Прозрачные исходные стекла термообработаны по одностадийному режиму при температуре 680 °С и по двухстадийным режимам с первой стадией при 680 °С и второй стадией в интервале температур 720–1200 °С с выдержкой на каждой стадии 6 ч. Исследованы структура, фазовые превращения и оптические свойства исходных стекол и стеклокристаллических материалов (СКМ) методами дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгенофазового анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света, оптической спектроскопии поглощения. Измерены плотность и коэффициенты термического расширения исходных стекол и СКМ.

Установлено, что окислительно-восстановительные условия синтеза влияют на кинетику ликвационного фазового распада и кристаллизации стекол.

Получены прозрачные СКМ на основе наноразмерных кристаллов γ - Al_2O_3 и/или литиевоалюмосиликатных твердых растворов со структурой β -кварца. Материалы теряют прозрачность при выделении кристаллов литиевоалюмосиликатных твердых растворов со структурой β -сподумена. Это происходит при температурах термообработки 900 °С и 1000 °С для материалов, синтезированных в нормальных и окислительных условиях термообработки соответственно. В СКМ средние размеры кристаллов γ - Al_2O_3 составляют ~20 нм, твердого раствора со структурой β -кварца — ~40 нм.

Интенсивное поглощение СКМ, полученных из стекла, синтезированного в нормальных условиях, в спектральной области 400–1500 нм обусловлено d-d переходами октаэдрически координированных ионов Ti^{3+} в наноразмерных кристаллах γ - Al_2O_3 и интервалентными переходами $\text{Ti}^{3+} \leftrightarrow \text{Ti}^{4+}$. При кристаллизации γ - Al_2O_3 обнаружено структурирование полосы поглощения в области 2700–3100 нм, связанное с вхождением OH^- групп в нанокристаллы шпинели.

Значения КТР стекол в интервале температур 20–320 °С равны $\sim 4,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, они возрастают до $\sim 5,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в СКМ на основе γ - Al_2O_3 и падают при кристаллизации литиевоалюмосиликатного твердого раствора со структурой β -кварца, достигая значения $\sim 0,3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Изменение условий синтеза стекол позволяет управлять содержанием ионов титана в различных степенях окисления, что важно для создания материалов фотоники, содержащих ионы переходных металлов переменной валентности.

О НИЗКИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПОКАЗАТЕЛЯ РАССЕЯНИЯ СТЕКЛОКЕРАМИК

М. П. Шепилов

АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: m.shep@mail.ru

Аннотация. В работе обсуждается вопрос о показателе рассеяния стеклокерамик. Анализ литературных данных по оптической плотности (или светопропусканию) образцов и структуре этих материалов позволил заключить, что показатель рассеяния может быть меньше рэлеевского значения 4, что часто обусловлено неоднородностью распределения кристаллов в стекле. Литературные данные использованы для объяснения формирования неоднородностей и описания характера светорассеяния.

Зависимость коэффициента рассеяния α_s (или внутренней оптической плотности, обусловленной светорассеянием) стеклокерамик от длины волны λ описывается в некотором интервале длин волн степенной функцией, формула (1):

$$\alpha_s(\lambda) = a\lambda^s, \quad (1)$$

где показатель степени s называют показателем рассеяния. Часто значение s превышает рэлеевское значение 4, что связывают с наличием элементов упорядочения в расположении кристаллов и с возникающими при этом интерференционными эффектами в светорассеянии.

В данной работе мы оцифровали графические спектры оптической плотности (или пропускания) большого числа стеклокерамик, представленные в литературе, и пришли к заключению, что для ряда стеклокерамик самых разнообразных систем показатель рассеяния s меньше рэлеевского значения 4, а именно, находится в интервале от 2 до 4 (в основном это сильно рассеивающие стеклокерамики).

Иногда рассеяние с $s < 4$ упоминается авторами и связывается с рассеянием Ми большими кристаллами (размером микрон и более). Однако наш опыт изучения литературы показывает, что наиболее часто стеклокерамики с таким светорассеянием содержат только наноразмерные кристаллы, и предлагаемое объяснение не может быть использовано. В то же время, обращает на себя внимание факт, что эти наноразмерные кристаллы распределены в матрице стекла неоднородно: есть области, в которых кристаллы отсутствуют, в других же они образуют скопления («кластеры»). В таких случаях рассеяние света объясняется рассеянием Ми на кластерах, размер которых существенно превосходит размер составляющих их кристаллов.

Такое распределение кристаллов легко понять, основываясь на современных представлениях о структуре стекла, согласно которым исходное стекло состоит из жестких (rigid) и гибких (floppy) областей, причем зарождение кристаллов происходит преимущественно в гибких областях.

Теоретическое описание рассеяния света системой таких кластеров представляется чрезвычайно сложным, поскольку кластеры имеют разные размеры и форму и не исключены интерференционные эффекты в рассеянии как самими кластерами, так и составляющими их кристаллами. Мы предлагаем использовать результаты, полученные рядом авторов для систем липких (sticky), твердых (adhesive) сфер, кластеризация в которых определяется объемной долей сфер, их параметрами взаимодействия и температурой. Например, для наиболее простого случая монодисперсных сфер получено аналитическое выражение для структурного фактора, определяющего интерференционные эффекты в рассеянии света системой кластеров из сфер. Используя это выражение и варьируя параметры системы, мы смогли теоретически описать рассеяние света стеклокерамиками, характеризуемыми показателем рассеяния $s < 4$.

СОПОЛИМЕРЫ ФЛУОРЕНА И ДИКАРБОНИТРИЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ СТИЛЬБЕНА И ФЕНАНТРЕНА — МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЛИМЕРНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ДИОДОВ И ФОТОДИОДОВ*

А. А. Якиманский¹, Т. Г. Чулкова¹, Д. А. Лыпенко², А. В. Якиманский¹

¹ ПИЯФ им. Б. П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт» —
Институт высокомолекулярных соединений

² Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина
e-mail: antonyyakimanskiy@yandex.ru

Аннотация. В работе получены новые сополимеры 9,9-диоктилфлуорена и серии дикарбонитрильных производных стильбена и фенантрена, изучены их фото- и электролюминесцентные свойства, а также исследована возможность их применения в роли фоточувствительного слоя в органических фотодиодах.

Известно, что сополифлуорены выделяются среди π -сопряженных полимеров благодаря своим фото- и электролюминесцентным свойствам и стабильности [1, 2]. Основным методом получения сополифлуоренов является поликонденсация по Сузуки, которая позволяет вводить в основную цепь полимера различные по своим свойствам фрагменты и получать материалы с заданными характеристиками. Дикарбонитрильные производные стильбена и фенантрена обладают выраженными электроакцепторными свойствами, что позволяет не только добиться частичного или полного переноса заряда и значительного Стоксова сдвига люминесценции, но и способствует электронной проводимости получаемого материала.

С помощью реакции поликонденсации по Сузуки мы получили серию сополимеров 9,9-диоктилфлуорена и дикарбонитрильных производных стильбена и фенантрена (рис. 1). Мы изучили влияние природы и количества вводимых сомономеров на характер фотолюминесценции растворов и пленок полимеров и их электролюминесцентные свойства. Полученные сополимеры были опробованы в роли фоточувствительного слоя в комбинации с N,N'-ди(2-этилгексил)-3,4,9,10-перилендикарбоксимидом (PTCDI).

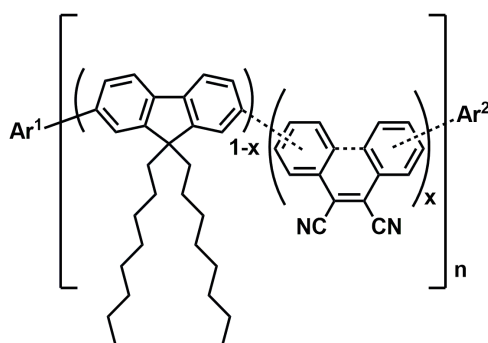


Рис. 1. Структура исследуемых сополифлуоренов

Литература

1. Yakimanskiy A.A., Mitroshin A.M., Chulkova T.G., Miltsov S.A., Yakimanskiy A.V. Fluorene-based π -conjugated polymers for OLEDs: advances, opportunities, and challenges // *Mendelev Communications*. 2024. No. 34. P. 609–629.
2. Carbas B.B. Fluorene based electrochromic conjugated polymers: A review // *Polymer*. 2022. No. 254. P. 125040.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-43-00060).

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ СВИНЦОВО-СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА МЕТОДОМ ЛИЭС

А. А. Леонидова, М. Д. Басманов, Н. В. Никоноров

Университет ИТМО
e-mail: aaleonidova@itmo.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния параметров лазерного излучения (плотности энергии в импульсе, частоты лазера, задержки между импульсом и регистрацией сигнала, длины волны лазера) на интенсивность спектральных линий в эмиссионных спектрах свинцово-силикатных стекол. Разработан метод исследования распределения свинца в силикатной матрице с помощью метода лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для задач оптимизации технологии синтеза свинцово-силикатных стекол. Показано, что данный метод позволяет определять локальные изменения концентрации свинца и кремния в двухкомпонентной системе.

Явление оптического пробоя в прозрачных твердых телах известно с 1964 г., с тех пор проведено большое количество различных исследований, направленных на выявление механизмов взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками. В настоящее время разработано и представлено множество моделей лазерного разрушения прозрачных твердых тел, вызываемого такими эффектами, как многофотонная ионизация, генерация гиперзвука при вынужденном мандельштам-бриллюэновском рассеянии света, тепловыми эффектами (прежде всего, это термоупругие напряжения, тепловая ионизация и др.). Тепловые эффекты, как правило, обуславливают так называемый несобственный пробой, поскольку они вызваны наличием различных поглощающих дефектов и включений [1].

Поглощающие дефекты и включения всегда присутствуют в материале в том или ином количестве и являются первостепенным источником лазерного разрушения не только поверхности прозрачного тела, но и объема, поскольку наличие поглощающих включений значительно снижает порог интенсивности, при котором происходит лазерный пробой. В случае со свинцово-силикатными стеклами таким поглощающим дефектом будет, в первую очередь, свинец в составе самой силикатной матрицы (содержание PbO в стекле может составлять от 25 до 67 мол. %). Край полосы поглощения свинцово-силикатного стекла находится в диапазоне 333–372 нм, в зависимости от содержания PbO (чем больше оксида свинца в составе, тем больше сдвиг полосы поглощения в видимую область). В связи с этим интерес представляет исследование взаимодействия лазерного излучения с силикатными стеклами в области их прозрачности, поскольку влияние поглощающих дефектов должно быть минимальным [2].

В рамках настоящей работы для исследования воздействия лазерного излучения на поверхность прозрачных твердых тел были выбраны образцы свинцово-силикатного стекла с содержанием PbO 35–70 мол. %. Лазерная абляция поверхности образцов свинцово-силикатных стекол производилась на наносекундном импульсном Nd:YAG-лазере в режиме модуляции добротности на длинах волн 532 нм и 1064 нм. Одна из задач данного исследования заключалась в определении порога лазерного пробоя для высокосвинцового стекла (~70 мол. % PbO) и для стекла с более низким содержанием оксида свинца (~35 мол. % PbO). На основе проанализированных спектров плазмы лазерного пробоя установлена зависимость интенсивности аналитического сигнала от параметров лазерного излучения (плотности энергии лазерного импульса, длительности задержки между импульсом и регистрацией сигнала, частоты лазера). Также определена

зависимость размеров и формы области разрушения (кратеров абляции) от количества произведенных лазерных импульсов и химического состава образца.

На основе полученных данных разработан полуколичественный метод лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии (ЛИЭС). Измерения методом ЛИЭС произведены на референсных образцах свинцово-силикатных стекол, синтезированных по стандартам ГОСТ, а также на тестовом образце, синтезированном в фарфоровом тигле без перемешивания. Для данных образцов произведено картирование распределения свинца и кремния на поверхности и в объеме. Показано, что разработанный метод ЛИЭС позволяет выявлять изменения в химическом составе с высокой точностью.

Литература

1. *Щукин А. С.* Исследование структуры разрушений стекол при воздействии наносекундными лазерными импульсами // Известия Тульского государственного университета. 2010. № 1. С. 150–159.
2. *Степанов А. Л., Попок В. Н., Хол Д. Е., Бухараев А. А.* Взаимодействие мощных импульсов лазерного излучения со стеклами, содержащими имплантированные металлические наночастицы // Физика твердого тела. 2001. № 43(11). С. 2100–2106.

УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ ПЛЕНОК WO₃ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ УГЛА НАПЫЛЕНИЯ*

М. М. Сычев^{1, 2}, А. А. Ерузин¹, П. А. Каташев^{1, 3}, С. В. Мякин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

² Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН

³ АО «Северо-Западный региональный центр Концерна
ВКО «Алмаз-Антей» — Обуховский завод»
e-mail: svmjakin@technolog.edu.ru

Аннотация. Предложен перспективный подход к управлению структурой и свойствами получаемых методом магнетронного напыления слоев оксида вольфрама за счет периодической модуляции угла нанесения, что приводит к формированию пленок с периодическим изменением плотности и в сочетании с особой морфологией поверхностного слоя и повышенной шероховатостью поверхности обеспечивает значительное улучшение характеристик электрохромных устройств на их основе.

Магнетронное напыление является высокопроизводительным и хорошо воспроизводимым методом получения электрохромных слоев на основе оксида вольфрама, обратимо изменяющих окраску и прозрачность под действием электрического тока и применяемых в конструкциях энергосберегающих «умных» окон, антибликовых покрытий, дисплеев и ряда других устройств. Однако данная технология не в полной мере обеспечивает формирование развитой поверхности и пористой структуры получаемого слоя и, соответственно, площади его контакта с электролитом, необходимой для достижения требуемой электрохромной эффективности [1].

Для преодоления указанного недостатка нами разработан метод, основанный на периодической модуляции угла нанесения вольфрам-оксидного слоя в диапазоне от 0 до 180° [2]. Это обеспечивает повышение электрохромной эффективности на 25 % и почти двукратное увеличение оптического контраста. Достигнутый эффект обусловлен формированием пленок с периодическим изменением плотности, имеющих более развитую поверхность, а также регулированием их фрактальной микроструктуры. Применяемая модуляция угла нанесения приводит к значительному снижению ла-куарности в распределении зерен оксида вольфрама в поверхностном слое, что свидетельствует о повышении его структурной упорядоченности.

Литература

1. Park S.I., Quan Y.J., Kim S.H., Kim H., Kim S., Chun D.-M., Lee C.S., Taya M., Chu W.-S., Ahn S.-H. A review on fabrication processes for electrochromic devices // International journal of precision engineering and manufacturing — green technology. 2016. No. 3. P. 397.
2. Syrov M., Eruzin A., Semenova A., Katashev P., Mjakin S., Zhukov A., Aglikov A., Nosonovsky M., Skorb E. Deposition of Nanostructured Tungsten Oxide Layers by a New Method: Periodic Modulation of the Deposition Angle // Langmuir. 2023. No. 39. P. 12336.

* Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям, договор № 17828ГУ/2022.

СИНТЕЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ ЭЛЕКТРОХРОМНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗА*

*Н. Е. Штомпель¹, Е. В. Николаева¹, В. В. Томаев^{1, 2},
С. В. Мякин¹, С. А. Зайцева¹*

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

² Санкт-Петербургский горный университет
e-mail: kolzyes@gmail.com

Аннотация. Предложен высокопроизводительный способ нанесения прозрачных проводящих покрытий легированного фтором оксида олова (FTO) и слоев оксида вольфрама на стеклянные подложки посредством спрей-пиролиза с автоматически регулируемой подачей реагентов и температурным режимом процесса, позволяющий изготавливать высокоэффективные электрохромные устройства и перспективный для масштабирования.

«Интеллектуальные» электрохромные материалы, способные обратимо изменять прозрачность и окраску под действием электрического тока, применяют в различных устройствах современной техники, включая «умные» окна и иллюминаторы с регулируемым затемнением, дисплеи, антибликовые покрытия автомобильных зеркал и т. д. [1]. Вместе с тем, их внедрение ограничено рядом недостатков существующих технологий изготовления электрохромных слоев — высокой стоимостью магнетронного напыления либо сложностью масштабирования химического и физического осаждения из жидкой или газовой фазы. Перспективным альтернативным подходом является метод спрей-пиролиза, основанный на одновременном дозировании распыляемых компонентов и их осаждении при определенной температуре. Сложность реализации данного подхода заключается в необходимости прецизионного регулирования подачи реагентов и температурного режима процесса [2].

Для решения данной задачи нами была создана лабораторная установка, включающая небулайзеры для раздельной подачи реагентов в виде аэрозолей, шаговые двигатели для регулирования расстояния от точки ввода, а также систему управления параметрами процесса, включающую терморегулятор, хромель-алюмелевую термопару и модуль реле на базе микроконтроллера Arduino Uno. Проведенные испытания показали, что разработанный программно-технический комплекс перспективен для масштабирования и внедрения высокопроизводительной технологии изготовления функциональных слоев электрохромных устройств (прозрачных электродов на основе FTO и слоев оксида вольфрама, в том числе содержащих различные добавки), а также нанесения ряда других функциональных слоев, в том числе многослойных покрытий с регулируемым составом, необходимых в различных областях использования современной техники, в частности, в оптических приборах и сенсорных устройствах.

Литература

1. Guo J., Liang Y., Zhang S., Ma D., Yang T., Zhang W., Li H., Cao S., Zou B. Recent progress in improving strategies of metal oxide-based electrochromic smart window // *Green Energy and Resources*. 2023. No. 1. P. 100007.
2. Falcony C., Aguilar-Frutos M. A., Garcia-Hipolito M. Spray Pyrolysis Technique; High-K Dielectric Films and Luminescent Materials: A Review // *Micromachines*. 2018. No. 9(8). P. 414.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-23-00140.

ЭЛЕКТРОУПРАВЛЯЕМЫЙ МОЗАИЧНЫЙ ФОТОННЫЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ИЗОЛЯТОР НА ОСНОВЕ МАССИВА ПРИЗМ*

П. Н. Ким^{1, 2}, М. Н. Крахалев^{1, 2}, Д. П. Федченко^{1, 2},
Н. В. Рудакова^{1, 2}, И. В. Тимофеев^{1, 2}

¹ Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН,
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

² Сибирский федеральный университет
e-mail: kimpn@iph.krasn.ru

Аннотация. В работе представлено исследование мозаичного фотонного топологического изолятора на основе периодического массива, составленного из стеклянных призм. Луч света, огибая дефекты, проходит по границе массива, тем самым демонстрируя топологическую устойчивость. При помощи электроуправляемого холестерика создается отражающий дефект на границе изолятора.

Фотонный топологический изолятор — это материал, который является проводником для излучения, распространяющегося по поверхности, но не в объеме [1]. Экспериментально реализован на мозаике из идентичных прозрачных призм, соединенных друг с другом посредством иммерсионной жидкости [2]. Траектория луча в таком изоляторе схематически показана на рис. 1а (сплошная линия). В статье [3] также дано теоретическое обоснование топологической устойчивости траектории луча.

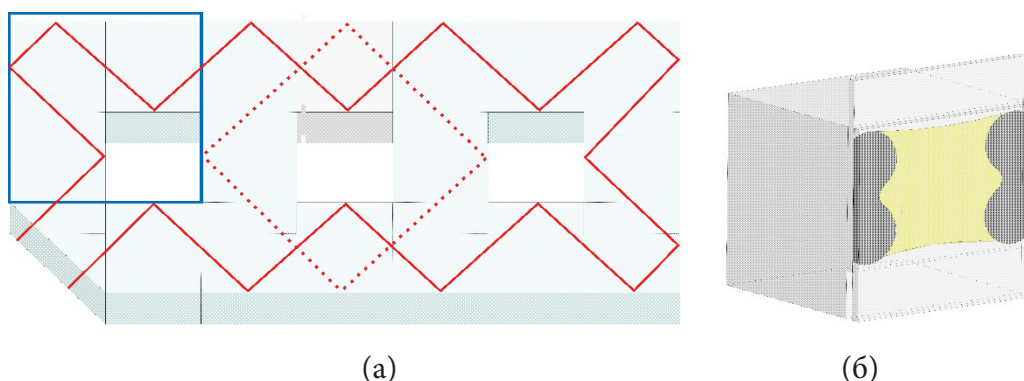


Рис. 1. (а) Модель мозаичного фотонного топологического изолятора. Синим обозначена элементарная ячейка периодической структуры, красным — траектория луча вдоль граничного ряда призм.
(б) Электроуправляемый отражающий дефект на границе изолятора. Желтым цветом обозначен холестерик, темно-серым — спейсеры ячейки

При нанесении на границу одной из призм слоя холестерика, вследствие изменения его ориентационной структуры при воздействии электрического поля, появляется возможность управления пропусканием лазерного пучка с циркулярной поляризацией (рис. 1а, пунктирная линия).

Литература

1. Hasan M. Z., Kane C. L. Colloquium: topological insulators // Reviews of modern physics. 2010. Vol. 82. No. 4. P. 3045.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00236.

2. *Kim P.N., Fedchenko D.P., Rudakova N. V., Timofeev I. V.* Tiling Photonic Topological Insulator for Laser Applications // *Appl.Sci.* 2023. Vol. 13. No. 6. P. 4040.
3. *Fedchenko D.P., Kim P.N., Timofeev I. V.* Photonic topological insulator based on frustrated total internal reflection in array of coupled prism resonators // *Symmetry.* 2022. Vol. 14. No. 12. P. 2673.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР, СОДЕРЖАЩИХ J-АГРЕГАТЫ

Р. К. Дойко^{1, 2}, А. Ю. Иванова¹, П. Н. Ким^{1, 2}, И. В. Тимофеев^{1, 2}

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

² Сибирский федеральный университет

e-mail: romandoyko@iph.krasn.ru

Аннотация. В данной работе изучены оптические спектры одномерного фотонного кристалла с дефектным слоем J-агрегата в полимерной матрице при различных углах падения света. Рассмотрены способы управления спектральными свойствами образца в зависимости от частоты резонанса J-агрегата и угла падения. Полученные результаты открывают новые перспективы для настройки оптических характеристик материалов, что может быть полезно при разработке оптоэлектронных устройств.

В настоящее время молекулярные J-агрегаты привлекают внимание благодаря узкополосному поглощению, что делает их перспективными при проектировании оптоэлектронных устройств, таких как фотодиоды и детекторы [1, 2]. Молекулы красителя интегрируются в полимерную матрицу. При этом они формируют агрегаты с максимумом поглощения, смещенным в длинноволновую область спектра по сравнению с максимумом поглощения отдельных молекул красителя [3]. Дополнительно оптические характеристики узкополосно поглощающих материалов могут существенно изменяться внутри фотоннокристаллических структур [4].

Исследуемая структура является одномерным фотонным кристаллом, где в центре находится дефектный слой, представляющий собой агрегат J562 в полимерной матрице [3]. На рис. 1 слева представлены действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости дефектного слоя в зависимости от длины волны.

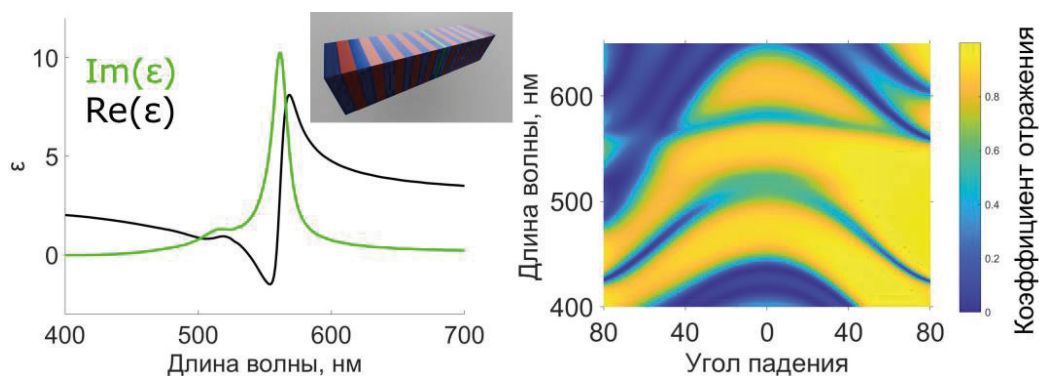


Рис. 1. Слева: дисперсия диэлектрической проницаемости ϵ дефектного слоя, действительная часть $\text{Re}(\epsilon)$ изображена черной линией, мнимая часть $\text{Im}(\epsilon)$ — зеленой.

Справа: спектр отражения исследуемой структуры в зависимости от угла падения излучения на образец для р-поляризации (левая половина спектра) и s-поляризации (правая половина спектра).

Вставка: схематичное представление исследуемой структуры, где чередующиеся слои SiO_2 (синий) и ZrO_2 (красный) равной толщины — по 75 нм; толщина де-фекта (зеленый слой) — 31 нм

Справа на рис. 1 представлен спектр отражения исследуемой структуры при различных углах падения света на образец для различных поляризаций. Спектры получены для конечной структуры с помощью метода трансфер-матрицы. Из рисунка видно, что

имеет место спектральное расщепление дефектной моды. Для нулевого угла падения света одна и та же дефектная мода проявляется вблизи длины волны 500 нм, а также вблизи 600 нм, что соответствует правому крылу по-лосы поглощения J-агрегата. Провалы отражения на этих длинах волн свидетельствуют об усилении поглощения света. Ранее было описано аналогичное расщепление дефектной моды в фотоннокристаллической структуре с дефектным слоем, представляющим собой узкополосно поглощающий металл-диэлектрический нано-композит [4].

Наши результаты показывают, что комбинация фотоннокристаллической структуры и слоя J-агрегата дает возможность перестраивать максимум поглощения без изменения типа молекулы, варьируя угол падения света на образец в видимом диапазоне длин волн.

Литература

1. *Schembri T., Kim J. H., Liess A., Stepanenko V., Stolte M., Würthner F.* Semitransparent layers of social self-sortingmerocyanine dyes for ultranarrow bandwidth organic photodiodes // *Advanced Optical Materials*. 2021. No. 9. P. 2100213.
2. *Sun B., Zhou G., Wang Y. et al.* Ultra-narrowband photodetector with high responsivity enabled by integrating monolayer J-aggregate organic crystal with graphene // *Advanced Optical Materials*. 2021. No. 17. P. 2100158.
3. *Holder S. T., Estévez-Varela C., Pastoriza-Santos I., Lopez-Garcia M., Oulton R., Núñez-Sánchez S.* Bio-inspired building blocks for all-organic metamaterials from visible to near-infrared // *Nanophotonics*. 2023. No. 2. P. 307–318.
4. *Vetrov S. Ya., Avdeeva A. Yu., Timofeev I. V.* Spectral properties of a one-dimensional photonic crystal with a resonant defect nanocomposite layer // *J. Exp. Theor. Phys.* 2011. No. 113. P. 755–761.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ СО СТРУКТУРОЙ ФТОРАПАТИТА МЕТОДОМ ГОРЯЧЕГО ПРЕССОВАНИЯ*

М. Д. Назмутдинов, Д. А. Пермин, С. А. Мельников

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского
e-mail: nazmutdinov@chem.unn.ru

Аннотация. Работа посвящена получению оптических керамик фторофосфата кальция (FAP), фторофосфата (SFAP) и фтораарсената (SFAs) стронция методом горячего прессования. Полученные образцы керамики с анизотропной кристаллической структурой благодаря ограничению среднего размера зерен на уровне 100–200 нм имеют пропускание в среднем ИК-диапазоне 85–90 %.

На данный момент круг керамических оптических и активных лазерных сред в основном ограничен материалами с кубической кристаллической решеткой. Это ограничение объясняется тем, что анизотропия некубических структур приводит к высоким оптическим потерям из-за двулучепреломления на границах зерна керамики. Тем не менее, изготовление лазерной керамики на основе гексагональных фторапатитов видится перспективным, поскольку известно, что фторапатиты, легированные ионами РЗЭ, являются эффективными активными средами, обладающими высокими генерационными характеристиками [1].

Нанопорошки-прекурсоры керамик были синтезированы методом осаждения из раствора. В качестве осадителя использовался раствор гидрофосфата аммония (для FAP и SFAP), мышьяковой кислоты (для SFAs) и фторида аммония. В качестве растворимых солей металлов — нитраты кальция и стронция. Порошки были спечены методом горячего прессования в графитовой пресс-форме до плотностей, близких к теоретическим. Полученные керамики имеют плотную структуру, средний размер зерен составляет около 130 нм, что близко к среднему размеру частиц в исходных порошках.

Максимальное пропускание керамик в среднем ИК-диапазоне — 90 % для керамики FAP, 85,8 % для керамики SFAP и 89,5 % для керамики SFAs. В частности, было установлено, что керамика SFAs имеет более широкий диапазон прозрачности (до ~6 мкм), чем керамика FAP и SFAP (до ~5 мкм) (рис. 1).

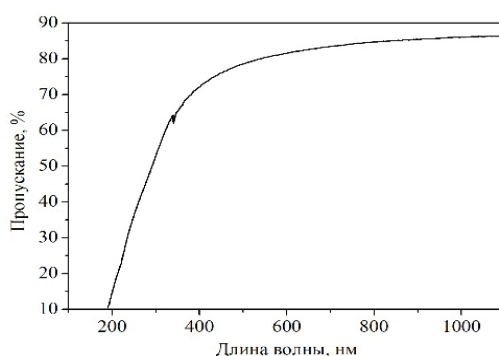


Рис. 1. Спектр пропускания керамики FAP в видимом диапазоне

Литература

1. Schaffers K. I., Tassano J. B., Bayramian A. B., Morris R. C. Growth of Yb: S-FAP [Yb³⁺:Sr₅(PO₄)₃F] crystals for the Mercury laser // J. Cryst. Growth. 2003. No. 253. P. 297–306.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (базовая часть государственного задания, проект № ФСВР-2023-0025) и программы «Приоритет 2030» Национального исследовательского университета имени Н. И. Лобачевского.

ВИЗУАЛИЗАТОРЫ МОЩНОГО ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНТИСТОКСОВЫХ ЛЮМИНОФОРОВ $(Y_{1-x-y}Yb_xEr_y)_2O_3-MgO^*$

Т. С. Поздова¹, Д. А. Пермин¹, М. Д. Назмутдинов¹, М. С. Болдин¹,
С. В. Курашкин¹, И. Л. Снетков², Т. Л. Барышников¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

² Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

e-mail: pozdova@unn.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты изготовления высокоскоростным электроимпульсным спеканием керамических композитных антистоксовых люминофоров $(Y_{1-x-y}Yb_xEr_y)_2O_3-MgO$ для визуализации инфракрасного лазерного излучения и исследование их свойств. Установлено, что полученные материалы обладают высокими механическими свойствами и способны преобразовывать инфракрасное лазерное излучение в спектральном диапазоне длин волн 0,8–1,5 мкм в люминесценцию видимого диапазона длин волн.

На сегодняшний день лазеры ближнего инфракрасного диапазона широко используются в обработке материалов, медицине, лидарах, системах связи, в фундаментальных исследованиях [1]. Для настройки и юстировки таких лазеров необходимо использовать специальные устройства, обеспечивающие возможность детектировать направление лазерного излучения в видимом диапазоне. Известны визуализаторы инфракрасного излучения, работающие на эффекте ап-конверсии (антистоксовой люминесценции) [2, 3]. По сравнению с полупроводниковыми приборами они отличаются низкой стоимостью и простотой эксплуатации. В качестве активного компонента, определяющего люминесценцию, выступает одновременное легирование двумя или более видами ионов редкоземельных элементов. Одним из наиболее популярных сочетаний лигатуры является добавка иттербия и эрбия в количестве 0,1–1 %.

В результате исследования были получены образцы керамических визуализаторов диаметром 15 мм и толщиной 2–3 мм с диапазоном детектирования ИК-излучения 0,8–1,5 мкм и высоким порогом разрушения 4,5 кВт/см². На рис. 1 представлены спектры антистоксовой люминесценции изготовленных визуализаторов $(Y_{0.985}Yb_{0.01}Er_{0.005})_2O_3-MgO$ при облучении ИК-излучения с длинами волн 808 нм (а), 975 нм (б).

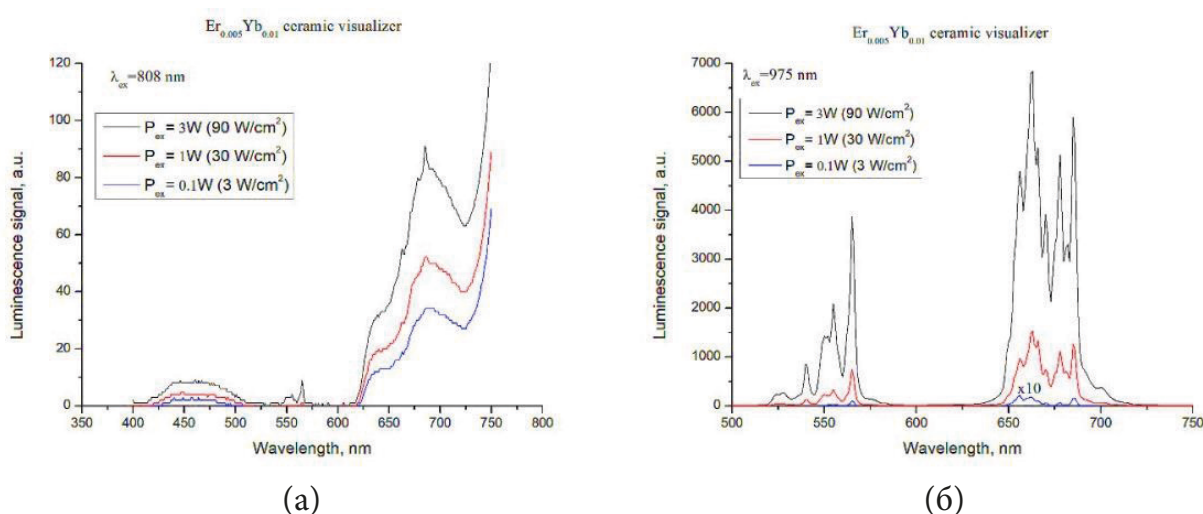


Рис. 1. Спектры антистоксовой люминесценции визуализатора $(Y_{0.985}Yb_{0.01}Er_{0.005})_2O_3-MgO$ при облучении ИК-излучения с длинами волн: (а) 808 нм; (б) 975 нм

* Работа выполнена за счет средств Российского научного фонда, грант № 22-73-10084.

Литература

1. *Harris D.C., Cambrea L.R., Johnson L.F., Seaver R.T., Baronowski M., Gentilman R. et al.* Properties of an infrared-transparent MgO:Y₂O₃ nanocomposite // J Am Ceram Soc. 2013. No. 96(12). P.3828–35.
2. *Blair V.L., Fleischman Z.D., Merkle L.D., Ku N., Moorehead C.A.* Co-precipitation of rare-earth-doped Y₂O₃ and MgO nanocomposites for mid-infrared solid-state lasers // Appl Opt. 2017. No. 56(3). P.B154.
3. *Ma H.J., Jung W.K., Park Y., Kim D.K.* A novel approach of aninfrared transparent Er:Y₂O₃—MgO nanocomposite for eye-safelaser ceramics // J Mater Chem C.2018. No. 6(41). P.11096–103.

ГЕНЕРАЦИЯ ВТОРОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ГАРМОНИКИ В СТЕКЛЕ, СТРУКТУРИРОВАННОМ ЭЛЕКТРО-СТИМУЛИРОВАННОЙ ДИФФУЗИЕЙ

Г. Кан^{1, 2}, Ч. Цуй², А. Н. Терпицкий¹, С. А. Щербак^{1, 2}, А. А. Липовский^{1, 2}

¹ СПбАУ им. Ж. И. Алфёрова РАН

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
e-mail: kan@spbau.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию оптической нелинейности второго порядка приповерхностной области стекла. Нами впервые была продемонстрирована генерация второй оптической гармоники в стекле, вблизи поверхности которого ионы натрия замещены ионами калия с профилем концентрации калия, близким к ступенчатому.

В выполненных экспериментах натрий-силикатное стекло толщиной 1 мм приводилось в контакт с разогретыми до температуры 365 °С расплавами KNO_3 и NaNO_3 с анодной и катодной стороны соответственно, после чего подавалось постоянное электрическое напряжение. Через образец площадью 1 см² был пропущен заряд величиной 1 Кл. После охлаждения образца вблизи его анодной стороны был сформирован близкий к ступенчатому профиль концентрации ионов калия. Приложение к образцу электрического напряжения 1,3 кВ при комнатной температуре вызывало накопление неравновесного заряда вблизи фронта концентрации калия за счет эффекта Максвелла — Вагнера [1]. Электрическое поле этого заряда индуцировало в стекле квадратичную оптическую нелинейность согласно механизму EFISH (Electric-Field Induced Second-Harmonic) [2]. Измерения временной динамики проходящего через образец тока и зарегистрированного сигнала второй оптической гармоники (ВГ) при приложении и выключении напряжения с замыканием анодного и катодного контактов приведены на рис. 1(а) и (б) соответственно. Оцененное время установления/релаксации сигнала ВГ составило ~200 с.

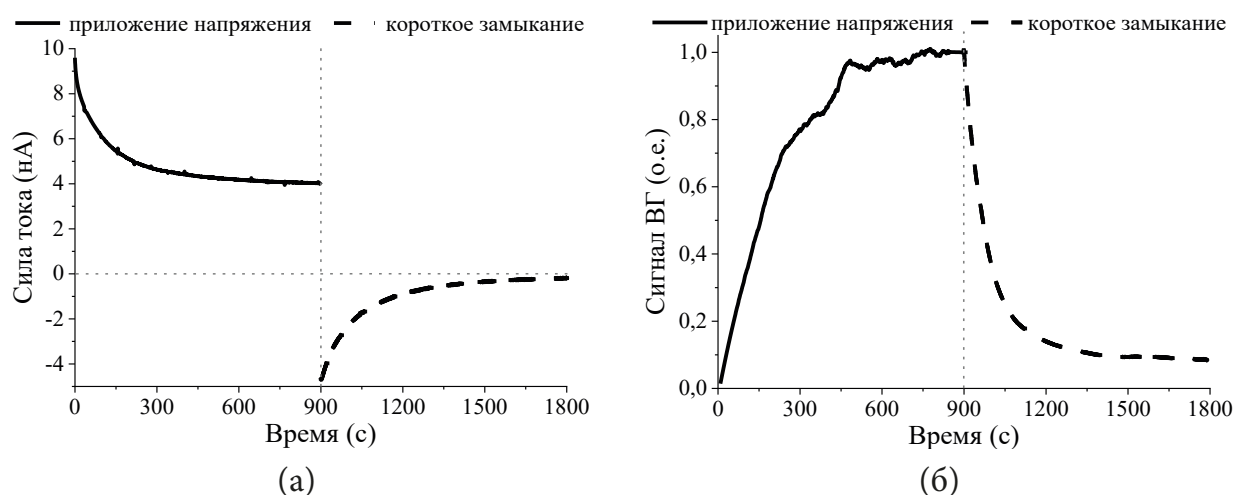


Рис. 1. Динамика величины тока (а) и сигнала ВГ (б) от образца структурированного стекла при поданном напряжении и после замыкания катодной и анодной сторон

Полученный эффект впервые наблюдался в стеклах, модифицированных с помощью электро-стимулированной диффузии ионов из расплава.

Литература

1. *Iwamoto M.* Maxwell — Wagner Effect BT // Encyclopedia of Nanotechnology / Ed. by B. Bhushan. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. P 1–13.
2. *Kazansky P. G., Russel P. S. J.* Thermally poled glass: frozen-in electric field or oriented dipoles? // Optics Communications. 1994. No. 110(5-6). P.611–614.

ГЕНЕРАЦИЯ ЧАСТОТНЫХ ГРЕБЕНОК И ДИСПЕРСНЫХ ВОЛН В МИКРОСФЕРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМОННЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ

А. Ю. Лунёв¹, Е. А. Михарев¹, А. И. Сидоров¹, П. А. Костин¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина)
e-mail: ayulunyov@stud.etu.ru

Аннотация. В этой работе представлены результаты расчетов оптических свойств и генерации оптических частотных гребенок (ОЧГ) в микросферических резонаторах, модифицированных плазмонными наночастицами (НЧ). Модификация микрорезонаторов НЧ позволяет контролировать ширину генерируемой ОЧГ путем подбора оптимальных размеров (легирования) НЧ.

В настоящее время широкий интерес представляют новые источники излучения в ближней ИК-области для задач сенсорики и оптоволоконных линий связи. ОЧГ, генерируемые в микрорезонаторах, зарекомендовали себя как перспективные источники для интегральной фотоники, однако остро стоит задача контроля отдельных параметров генерируемой ОЧГ [1]. Так, при изменении размера микрорезонатора изменяется не только ширина ОЧГ, но и область свободной дисперсии резонатора, которая должна быть постоянна. Модификация микрорезонаторов плазмонными НЧ может позволить контролировать ширину ОЧГ без значительного изменения области свободной дисперсии.

В табл. 1 представлены результаты расчета параметров ОЧГ в микрорезонаторах, модифицированных плазмонными НЧ CuS.

Таблица 1. Расчетные свойства ОЧГ для НЧ различных размеров

Концентрация НЧ CuS, М ⁻¹	Размер НЧ CuS, нм	Ширина ОЧГ, ТГц	Положение центра дисперсионной волны, ТГц	Пороговая мощность генерации ОЧГ, мВт	Добротность фундаментальной ТЕ на длине волны накачки	Область свободной дисперсии ОЧГ, ГГц
0	–	135	285	5	1e9	301
1e-4	5	180	316	7	7.6e8	301,2
1e-4	10	110	260	7.5	6.1e8	301,2
1e-4	13	98	242	9	4.9e8	301,4
1e-4	17	80	230	12	4.1e8	301,7

На основе численных расчетов с применением теории эффективной среды Максвелла — Гарнетта и модели Лузиато — Лефевра было показано, что ширину генерируемой ОЧГ в микросферическом резонаторе, модифицированном НЧ CuS, можно контролировать в диапазоне от 80 ТГц до 180 ТГц, при этом положение дисперсионной волны изменялось от 230 ТГц до 316 ТГц.

Литература

1. Yin Y. et al. Kerr frequency comb generation in microbottle resonator with tunable zero dispersion wavelength // Journal of Lightwave Technology. 2019. Vol. 37.21. P. 5571–5575.

РЕНТГЕНОЛЮМИНОФОРЫ НА ОСНОВЕ Gd_2O_2S , АКТИВИРОВАННЫЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

П. Ш. Устабаев, В. С. Коваленко, З. А. Струченков, В. В. Бахметьев

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
e-mail: ustabaev.parviz@mail.ru

Аннотация. В данной работе были синтезированы рентгенолюминофоры повышенной интенсивности на основе Gd_2O_2S , активируемые Tb и Pr, и проведена оптимизация их состава.

Рентгенолюминофоры играют важную роль в различных областях, где требуется высокочувствительная и высококонтрастная визуализация под воздействием рентгеновского излучения. В медицинской диагностике они используются для усиливающих экранов, позволяя снизить время экспозиции. Также рентгенолюминофоры нашли широкое применение в рентгеновской дефектоскопии. Данный метод анализа считается одним из наиболее достоверных способов определения качества материала без его предварительного разрушения [1]. Повышение интенсивности рентгенолюминесценции позволяет увеличить скорость и точность обнаружения дефектов.

Целью данной работы являлся синтез рентгенолюминофоров на основе Gd_2O_2S , обладающих повышенной яркостью и интенсивностью люминесценции. Для достижения этой цели нами было синтезировано несколько образцов люминофоров с различным содержанием Tb и Pr. В качестве исходных компонентов использовали оксиды гадолиния, тербия и празеодима. Для превращения их в оксисульфиды в шихту добавлялась сульфосмесь на основе Na_2CO_3 и S. В качестве плавней применяли $Na_2P_2O_7$ и LiF. Шихты готовили путем механического перемешивания компонентов. Прокаливание шихты осуществлялось в восстановительной атмосфере при температуре 1200 °С. Полученные люминофорные спеки подвергались тщательной отмывке от примесей, после чего люминофоры просеивались и высушивались в сушильном шкафу.

Рентгенофазовый анализ показал, что синтезированные люминофоры представляют собой оксисульфид гадолиния, не содержащий примесных фаз. Исследование спектров люминесценции проводилось с помощью установки на базе рентгеновского аппарата РПД-200 и спектрофлуориметра AvaSpec-3648. В качестве сравнительного анализа были сняты спектры всех люминофоров, синтезированных нами, параллельно с промышленным люминофором аналогичного состава.

По полученным результатам было определено влияние концентрации и типа активатора на свойства рентгенолюминофора, а также выявлен оптимальный состав шихты, обладающий максимальной интенсивностью рентгенолюминесценции. Было установлено, что наиболее интенсивный из синтезированных нами образцов более чем на 40 % превосходит по интенсивности промышленный образец сравнения. Это является положительным результатом, поскольку даже незначительное повышение интенсивности люминесценции приводит к существенному сокращению экспозиции, что, в свою очередь, дает возможность снизить дозу облучения при проведении различных медицинских исследований.

Литература

1. *Ильясов Л. В.* Физические основы и технические средства медицинской визуализации. 3-е изд. СПб.: Лань, 2021. 127 с.

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НАНОЛЮМИНОФОРА $\text{GdF}_3:\text{Tb}$

П. Д. Зыкова, В. В. Бахметьев

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)
e-mail: polly02z@yandex.ru

Аннотация. В данной работе рассмотрены синтез и моделирование структуры нанолюминофора $\text{GdF}_3:\text{Tb}$. Приведены данные параметров кристаллической решетки, а также построена модель строения люминофора $\text{GdF}_3:\text{Tb}$.

Люминофор — вещество, способное преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение, т. е. люминесцировать. Люминофоры $\text{GdF}_3:\text{Tb}$ можно применять в медицине в качестве компонента препарата для лечения онкологических заболеваний [1].

Для нанолюминофора $\text{GdF}_3:\text{Tb}$ с оптимальной концентрацией активатора (25 %), синтезированного гидротермальным способом, методом Ритвельда уточнены параметры кристаллической решетки и построена модель кристаллической структуры. В табл. 1 представлены параметры решетки синтезированного образца.

Таблица 1. Параметры кристаллической решетки, нм

Параметры решетки	a	b	c
Орторомбический GdF_3 (PDF CARD 12-788)	6,571	6,985	4,393
Нанолюминофор $\text{GdF}_3:\text{Tb}$ (25 %)	6,538	6,982	4,418

По данным, представленным в таблице, можно заметить, что в результате легирования параметры a и b уменьшились, а параметр c увеличился.

По посчитанным параметрам с использованием программ (ReX, VESTA) была построена модель строения люминофора $\text{GdF}_3:\text{Tb}$, представленная на рис. 1а.

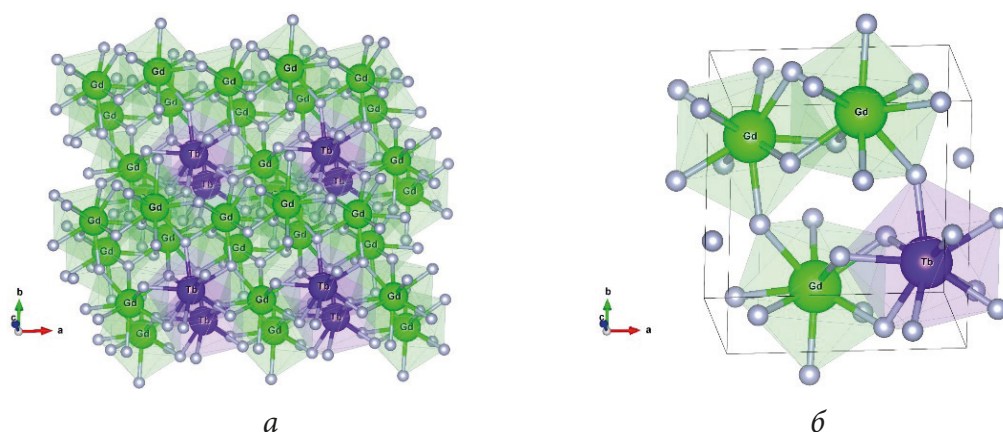


Рис. 1. Модель строения люминофора $\text{GdF}_3:\text{Tb}$

На рис. 1б представлена модель одной элементарной ячейки нанолюминофора. По данной модели можно увидеть, что максимальная яркость люминесценции достигается при такой концентрации тербия, когда в каждой элементарной ячейке кристаллической решетки присутствует ровно по одному атому тербия на три атома гадолиния.

Литература

1. *Зыкова П.Д., Бахметьев В.В.* Нанолюминофоры $\text{GdF}_3:\text{Tb}$ для использования в медицине // Нанопфизика и наноматериалы: сборник научных трудов международного семинара. СПб.: СПбГУ, 2023. С. 115.

СТЕКЛООБРАЗНЫЕ ВИСМУТСОДЕРЖАЩИЕ ФОТОЛЮМИНОФОРЫ, СОАКТИВИРОВАННЫЕ Ag^+ ИЛИ Y^{3+} *

М. А. Гирсова, Г. Ф. Головина, И. Н. Анфимова,
Л. Н. Куриленко, Т. В. Антропова

Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН
e-mail: girsovama@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования спектрально-оптических и люминесцентных свойств висмутсодержащих композиционных материалов на основе матриц из пористых стекол, соактивированных Ag^+ или Y^{3+} , в зависимости от условий их получения (влияние состава материала и режима его тепловой обработки).

В настоящее время интерес к материалам (наноккомпозиты, пленки, стекла и др.), соактивированным ионами висмута и серебра либо висмута и иттрия [1–5], обусловлен, в первую очередь, их предназначением для широкополосных волоконных усилителей, светодиодов, элементов солнечных батарей, дисплейных и фотокаталитических приложений [2, 3, 5].

В данной работе синтезированы висмутсодержащие композиционные материалы с переменным содержанием серебра или иттрия путем пропитки матриц из силикатных пористых стекол (состав по анализу, мас. % $0,30Na_2O \cdot 3,14B_2O_3 \cdot 0,11Al_2O_3 \cdot 96,45SiO_2$) [6] в подкисленных водно-солевых растворах $Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$ в присутствии $AgNO_3$ или $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ с их последующей тепловой обработкой композитов при температуре в диапазоне 650–870 °C.

Экспериментально подтверждено, что висмутсодержащие композиционные материалы, соактивированные Ag^+ или Y^{3+} , обладают фотолюминесценцией в широком спектральном диапазоне (200–900 нм) благодаря присутствию различных активных центров, вследствие чего могут рассматриваться в качестве новых перспективных твердотельных неорганических фотолюминофоров.

Литература

1. Dan H. K., Phan A.-L., Ty N. M., Zhou D., Qiu J. Optical bandgaps and visible/near-infrared emissions of Bi^{n+} -doped ($n = 1, 2$, and 3) fluoroaluminosilicate glasses via Ag^+ - K^+ ions exchange process // Opt. Mater. 2021. No. 112. P. 110762.
2. Scarangella A., Fabbri F., Reitano R., Rossi F., Priolo F., Miritello M. Visible emission from bismuth-doped yttrium oxide thin films for lighting and display applications // Sci. Rep. 2017. No. 7. P. 17325.
3. Meng L., Xu W., Zhang Q. Optical and structural properties of down-conversion Bi doped Y_2O_3 films for potential application in solar cell // Appl. Surf. Sci. 2017. No. 409. P. 187–193.
4. Hughes M. A., McMaster R., Proctor J. E., Hewak D. W., Suzuki T., Ohishi Y. High pressure photoluminescence of bismuth-doped yttria-alumina-silica glass // High Press. Res. 2022. No. 42. P. 94–104.
5. Sudhaik A., Khan A. A. P., Raizada P., Nguyen V.-H., Le Q. V., Asiri A. M., Singh P. Strategies based review on near-infrared light-driven bismuth nanocomposites for environmental pollutants degradation // Chemosphere. 2022. No. 291. P. 132781.
6. Антропова Т., Гирсова М., Анфимова И., Дроздова И., Поликова И., Ведисьчева Н. Structure and spectral properties of the photochromic quartz-like glasses activated by silver halides // J. Non-Cryst. Solids. 2014. No. 401. P. 139–141.

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИХС РАН. Государственная регистрация № 1021050501068-5-1.4.3 (проект FFEM-2022-0004) и 1023032900385-8-1.4.3 (Тематика 3).

ОСАЖДЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА В МИКРОФЛЮИДНЫЕ СИСТЕМЫ МЕТОДОМ ОБРАТНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЕРЕНОСА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РЕАКЦИИ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

*А. В. Балашов, А. Рамос Веласкес, А. Г. Бондаренко,
Д. В. Канонов, Г. В. Романова*

Университет ИТМО
e-mail: avbalashovwork@gmail.com

Аннотация. В этой работе впервые сообщается о повышении чувствительности готовых микрофлюидных систем с использованием лазерно-индуцированного обратного переноса (LIBT) для осаждения наночастиц. В этом исследовании метод LIBT использовался для локального создания покрытия на кварце (акцепторе) путем абляции мишени из серебра (донора) наносекундными лазерными импульсами. Наночастицы Ag нанесены на микрорезервуары из кварца, имитирующие микрофлюидные системы, используемые для обнаружения активных форм кислорода с помощью люминола.

Лазерно-индуцированный обратный перенос (LIBT) представляет собой одноступенчатый метод нанесения, который позволяет локализованно переносить металлы и полимеры на прозрачные, ультратонкие и растягивающиеся подложки [1]. Данный метод в том числе применим для осаждения наноразмерных частиц [2].

На рис. 1 приведены фотографии осажденных наночастиц, их распределение и интенсивность полученной в системе реакции хемилюминесценции.

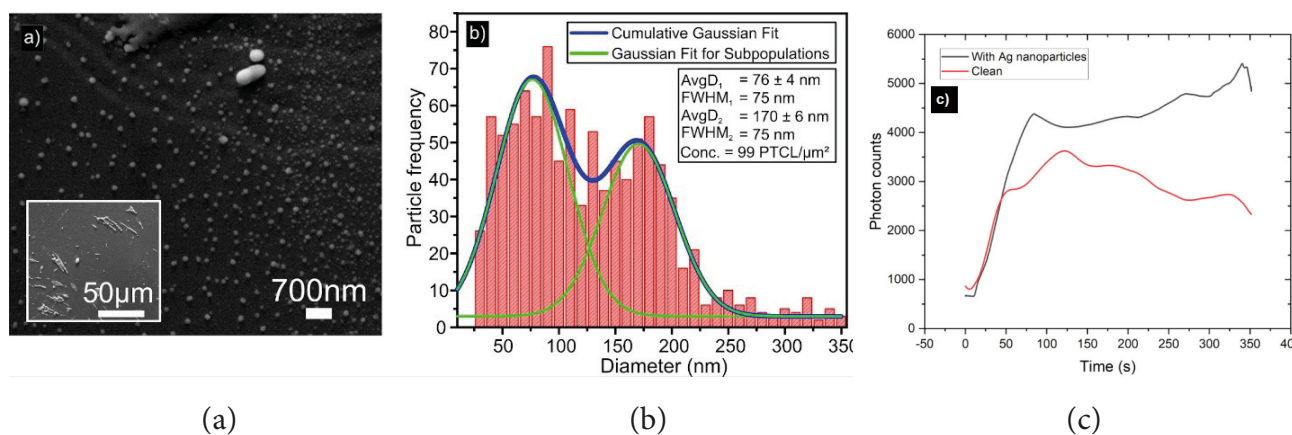


Рис. 1. (а) Изображение поверхности резервуара, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с наночастицами серебра, нанесенными методом LIBT с использованием потока лазерного излучения $26,1 \text{ Дж/см}^2$. На вставке показан снимок с меньшим увеличением, на котором видны капли расплавленного материала.
(б) Гистограмма, показывающая распределение нанесенных наночастиц по размерам.
(с) Зависимость интенсивности хемилюминесценции люминола в резервуарах с наночастицами и без них от времени

Полученные результаты демонстрируют заметную дисперсию в размерах осажденных наночастиц, что может сказываться на возникновении плазмонного резонанса в системе. Исследование квантового выхода реакции хемилюминесценции демонстрирует, что в среднем сигнал усиливается в два раза.

Литература

1. *Lee C. K. W.* et al. Laser-Induced Transfer of Functional Materials // Topics in Current Chemistry. 2023. Vol. 381. No. 4. P. 18.
2. *Zywietz U.* et al. Laser Printing of Nanoparticles // Laser Printing of Functional Materials: 3D Microfabrication, Electronics and Biomedicine. December 2017. P. 251–268.

ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ СИСТЕМЫ ZnO—MgO, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ Cu И Mn

М. А. Гаврилова¹, Д. А. Гаврилова^{1, 2}, С. К. Евстропьев^{1, 2, 3}

¹ Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ Университет ИТМО
e-mail: amonobel@yandex.ru

Аннотация. В работе было исследовано влияние добавок Cu и Mn на структурные, фотокаталитические и адсорбционные свойства композитов ZnO—MgO, синтезированных полимерно-солевым методом. Показана эффективность полученных фотокатализаторов под действием излучения с длиной волны 395 нм.

Интенсивное развитие фотокаталитических процессов определяет актуальность разработки новых фотоактивных материалов. В настоящей работе полимерно-солевым методом синтезированы композиты системы ZnO—MgO, модифицированные Cu и Mn, при содержании этих компонентов до 2 мол. %. В качестве исходных материалов при синтезе использовались водные растворы нитратов металлов и поливинилпирролидона. Высушенные полимерные гели подвергались термообработке при температуре 550 °С в течение 2 часов в воздушной атмосфере.

Аналитический состав полученных оксидных композитов был исследован методом энерго-дисперсионного анализа. Изучение кристаллической структуры композитов было выполнено методом рентгенофазового анализа с использованием прибора Rigaku Ultima IV. Анализ полученных рентгенограмм показал, что введение модифицирующих добавок практически не вызвало изменения размеров (13÷18 нм) оксидных нанокристаллов. Показано, что введение модифицирующих добавок Cu и Mn приводит к уменьшению объема элементарных ячеек кристаллов ZnO.

Исследование фотокаталитических свойств композитов проводилось под действием излучения матрицы светодиодов с длиной волны 395 нм. Водные растворы красителя Chicago Sky Blue (Sigma Aldrich) и навески синтезированных композиционных материалов помещались в кварцевые кюветы и подвергались облучению при периодическом измерении спектров поглощения растворов для определения концентрации красителя. Для описания кинетики фотокатализа использовались кинетические уравнения псевдопервого и псевдовторого порядков. Исследования показали, что скорость фотокаталитического разложения красителя существенно возрастает при увеличении содержания в композите модифицирующих добавок Mn. Это может объясняться существенным увеличением поглощения возбуждающего излучения при модификации марганцем кристаллов ZnO, наблюдавшемся ранее [1].

На основании проведенных исследований следует сделать вывод о перспективности модификации марганцем материалов на основе ZnO с целью значительного повышения их фотокаталитической активности.

Литература

1. Gavrilova M. A., Gavrilova D. A., Evstropiev S. K., Nikonorov N. V. Structure, spectral and photocatalytic properties of porous ZnO nanopowders modified by oxide compounds of manganese // Russ. J. Inorg. Chem. 2024. No. 69(3). P. 351–358.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ: ОТ СИНТЕЗА ШИХТЫ ДО ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

*П. В. Пестерева, А. Е. Львов, А. А. Южакова,
Д. Д. Салимгареев, Л. В. Жукова*

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: p.v.pestereva@urfu.ru

Аннотация. В данной работе проведен полный цикл работ по разработке и исследованию новой элементной базы для инфракрасной оптики — поликристаллические материалы на основе твердых растворов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-TlI}$.

С целью расширения класса поликристаллических материалов (оптической керамики), предназначенных для ИК-диапазона, с новыми химическими составами, обладающими не только высокими прозрачностью в ИК-области, твердостью, фото- и радиационными свойствами, но и сцинтилляционными характеристиками, были проведены исследования твердых растворов хлорид-бромид серебра, содержащих активирующую добавку ТlI. Данная работа посвящена исследованию фазовой диаграммы системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}\text{-TlI}$, синтезу материалов на ее основе, получению оптических изделий и изучению их оптических свойств.

Для синтеза оптических материалов по фазовой диаграмме были определены температуры плавления и начала кристаллизации материалов, а также области гомогенности и гетерогенности, где возможно получение монокристаллов и оптической керамики. В результате методом термозонной кристаллизации-синтеза [1] была получена высокочистая шихта различных составов с частотой по катионным примесям не более 1 ppm. После чего методом направленной кристаллизации [1] была выращена серия оптической керамики составов: 3, 6, 12, 34, 68 и 83 мол. % ТlI в $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ (рис. 1). Для исследования функциональных свойств оптической керамики методом горячего прессования были изготовлены поликристаллические пластины толщиной 350 ± 5 мкм и диаметром 15–20 мм. Образцы прозрачны в диапазоне от 0,5 до 41,7 мкм и более без окон поглощения, устойчивы к ультрафиолетовому облучению (на длинах волн 260–370 нм) при суммарном времени облучения 530 мин. с мощностью УФ-лампы 2 Вт с диаметром луча 8 мм. По методу Виккерса определена микротвердость всех образцов оптической керамики, которая составила от 1,77 до 4,78 усл. ед. в зависимости от состава при нагрузке 0,98 Н (100 грамм).



Рис. 1. Внешний вид синтезированных образцов оптической керамики

Литература

1. *Salimgareev D., Lvov A., Yuzhakova A., Shatunova D., Pestereva P., Yuzhakov I., Korsakov A., Zhukova L.* Synthesis and study of single crystals and optical ceramics based on the $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – AgI system // *Appl. Mater. Today*. 2023. No. 32. P. 101809.

Секция 3

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА

ОПТИМАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ SPUN СВЕТОВОДА ДЛЯ МАГНИТООПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

И. Л. Ловчий

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
e-mail: lovchy@niiоер.ru

Аннотация. Представлены результаты моделирования чувствительности магнитооптического датчика на spun световоде.

В зависимости от ориентации осей изгибного и встроенного линейных двулучепреломлений (ДЛП) световода относительно направления поляризации на входном торце волокна начальная чувствительность датчика составляет:

$$\bar{\eta} \pm \Delta\eta = \cos^2(\arctan(2\delta))(\cos^2\chi \pm \delta \sin(2\chi)), \quad (1)$$

где $\bar{\eta}$ — среднее значение чувствительности; $\pm\Delta\eta$ — диапазон вариаций чувствительности; $\delta = 2\beta_R\gamma/\beta^2$, $\chi = \arctan(\beta/2\gamma)$, β и γ — погонные величины встроенного линейного ДЛП волокна и угла его закрутки при вытяжке, β_R — погонная величина изгибного ДЛП [1].

На рис. 1 для пяти значений β_R (рад/м) показаны результаты моделирования чувствительности (точки) и расчета ее по формуле (1) (линии по центру и границам диапазона) при значении $\beta = 2000$ рад/м и варьировании параметра 2γ .

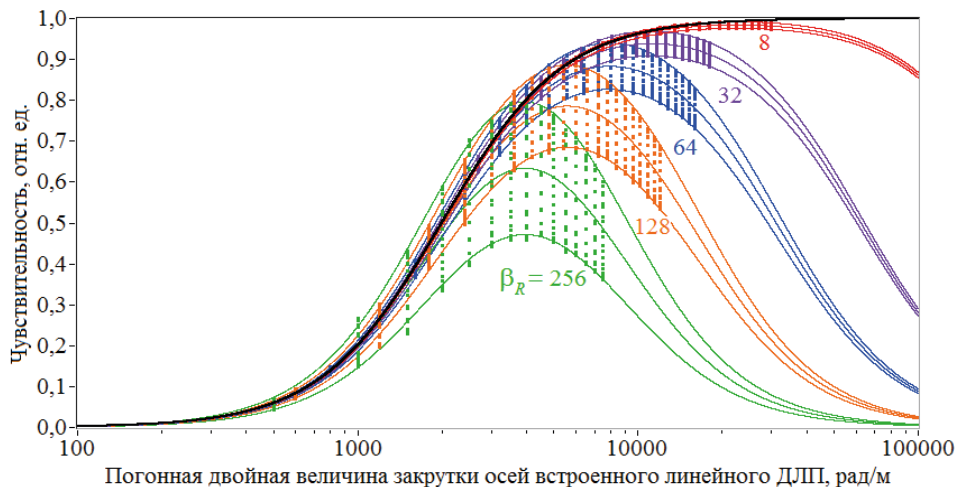


Рис. 1. Результаты моделирования и расчета чувствительности датчика на spun световоде при варьировании параметра 2γ . Точки, сгруппированные в вертикальных направлениях, отвечают вариациям чувствительности при вращении плоскости волоконных витков в пространстве

Анализ экстремальных точек рассчитанных по формуле (1) кривых показывает, что при заданных значениях изгибного ДЛП и параметра β световода максимальная средняя начальная чувствительность достигается при оптимальном значении $2\gamma_{\text{опт}} = \sqrt{\beta^3 / 2\beta_R}$, при этом чувствительность имеет величину $\eta = \cos^4(\arctan(\beta / 2\gamma_{\text{опт}}))$.

При заданных значениях изгибного ДЛП и параметра 2γ световода максимальная средняя начальная чувствительность достигается при оптимальном значении $\beta_{\text{опт}} = \sqrt[3]{2\sqrt{2}(2\gamma)^2 \beta_R}$, при этом чувствительность составляет $\eta = \cos^3(\arctan(\beta_{\text{опт}} / 2\gamma))$.

Литература

1. *Ловчий И.Л.* Моделирование предельных параметров поляризметрического волоконно-оптического датчика тока на *srin* световоде // Квантовая электроника. 2022. № 52(8). С. 764–774.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ*

А. А. Князева¹, С. Р. Егиян¹, О. А. Клименко¹, З. Али¹,
Л. В. Кулик², В. Н. Антонов¹

¹ Сколковский институт науки и технологии

² Институт физики твердого тела РАН

e-mail: anastasiya.knyazeva@skoltech.ru

Аннотация. В этой работе представлен пример получения закрученного излучения с использованием полых стеклянных оптических волокон с внутренним диаметром 300 мкм и внешним диаметром 1,6 мм, с внутренним неоднородным серебряным покрытием, а также применение подобного типа волокон для анализа газов методами спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС).

В настоящее время существуют различные методы создания закрученного излучения. Для этого применяются пространственные фазовые пластины или же голографические пространственные решетки [1]. Также ранее было показано, что подобное явление может наблюдаться при использовании оптических волокон с условием ввода излучения под углом [2].

Ввод линейно поляризованного лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 532$ нм осуществлялся под азимутальным углом $\gamma = 2,6^\circ$. Длина оптического волокна составляет 50 мм.

Спиральное излучение в дальнем поле (рис. 1) можно интерпретировать как результат интерференции между модами, несущими линейную поляризацию, и модами с орбитальным угловым моментом. Из-за большого размера стеклянной оболочки многие моды могут распространяться внутри стеклянной стенки. Часть из них не изменяют своих характеристик при распространении, а некоторые приобретают угловой момент в результате смещения лазерного луча на определенный угол относительно оси z .

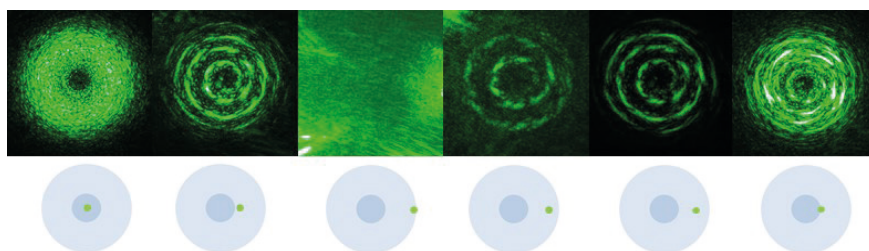


Рис. 1. Формирование спирали в зависимости от точки входа лазерного излучения

Оптические волокна с неоднородным серебряным покрытием могут использоваться также для методик спектроскопии комбинационного рассеяния света. Их применение позволяет регистрировать усиленный сигнал КРС от газовых смесей, что дает возможность использовать их в промышленности для неселективного анализа неизвестных газов и газовых смесей [3].

Экспериментально установлена возможность получения излучения с орбитальным угловым моментом с использованием полых оптических волокон большого диаметра с внутренним покрытием, состоящим из неоднородной серебряной пленки.

* Авторы выражают благодарность фонду «Сколково».

Литература

1. *Wang J.* et al. Study of characteristics of vortex beam produced by fabricated spiral phase plates // IEEE photonics Journal. 2016. Vol. 8. No. 2. P. 1–9.
2. *Mangini F.* et al. Rainbow Archimedean spiral emission from optical fibres // Scientific reports. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 1303.
3. *Khannanov M. N.* et al. Express analysis of gas with surface enhanced Raman scattering waveguide resonator // IEEE Sensors Journal. 2021. Vol. 21. No. 21. P. 24142–24148.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ КВАРЦЕВЫХ КИРАЛЬНЫХ МНОГОСЕРДЦЕВИННЫХ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ПРОФИЛЬ ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЛОГО ИСТОЧНИКА СВЕТА

*А. В. Бурдин^{1, 2, 3}, А. Ю. Барашкин³, А. С. Бородинов²,
М. В. Дашков³, В. В. Демидов¹, К. В. Дукельский^{1, 2, 4},
А. С. Евтушенко³, Е. С. Зайцева³, Е. В. Тер-Нерсисянц¹*

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

³ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

⁴ Университет ИТМО
e-mail: a.bourdine@goi.ru

Аннотация. В работе представлены результаты измерения профиля пучка оптического излучения источника белого света в дальнем поле при прохождении ранее разработанных и успешно изготовленных отрезков длиной 2 м опытных образцов кварцевых микроструктурированных оптических волокон с шестью легированными GeO₂ сердцевинами и наведенной закруткой 100 и 600 об/м.

Ранее в [1] нами были представлены впервые изготовленные опытные образцы протяженных (длина порядка 50 м) кварцевых микроструктурированных оптических волокон (МСОВ), успешно объединивших две базовые конфигурации волоконных световодов, уже изначально обладающих уникальными волноводными свойствами: киральные МСОВ (с наведенной в процессе вытяжки закруткой) и многосердцевинные МСОВ.

В данной работе представлены результаты измерения профиля пучка излучения источника белого света в дальнем поле при прохождении отрезков длиной 2 м указанных МСОВ с наведенной закруткой 100 и 600 оборотов/метр при равномерной радиальной засветке через одномодовое ОВ, центрированного и установленного с прецизионным зазором 150...200 мкм относительно торца тестируемого МСОВ. Исследовались МСОВ с 6 сердцевинами, легированными GeO₂, с квазиступенчатым профилем показателя преломления и диаметром 8,7 мкм. Внешний диаметр МСОВ соответствует диаметру «телекоммуникационного» ОВ по оболочке — 125 мкм (рис. 1).

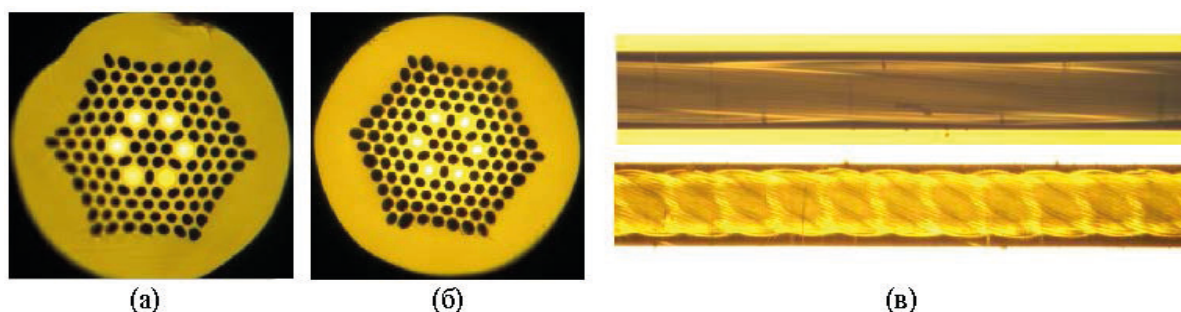


Рис. 1. Фото изготовленных образцов кварцевых киральных 6-GeO₂-сердцевинных МСОВ:
(а) закрутка 100 об/м; (б) закрутка 600 об/м; (в) продольное сечение

Опорные элементы МСОВ — микростержни, капилляры и внешняя опорная труба, а также сами заготовки германосиликатных сердцевин со ступенчатым профилем

показателя преломления изготавливались с применением доступных опорных труб из кварцевого стекла с высоким (более 1000 ppm) содержанием гидроксильных групп (аналог Heraeus Suprasil Standard, Saint-Gobain Spectrosil A/B, Corning HPFS 7980, JGS1, Dynasil 1100/Dynasil 4100, КУ-1 (ГОСТ 15130-86)). Заготовки сердцевин были реализованы с помощью MCVD-метода. По этой причине профиль показателя преломления содержал характерный технологический дефект в виде габаритного провала в центре стержня, а также «замытые» фронты/переходы ступенчатой формы, и далее рассматривался как квазиступенчатый с максимальной разностью значений показателя преломления 0,0300 и содержанием GeO_2 в кварцевом стекле 20,5 мол. %

Некоторые результаты измерения профиля пучка излучения источника белого света в дальнем поле и результаты постобработки (вычитания) полученных паттернов приведены на рис. 2. Полученные данные наглядно демонстрируют экспериментальное подтверждение предполагаемого эффекта «стягивания» поля суперпозиции мод введенного оптического излучения в условиях равномерной засветки торца МСОВ в центры германосиликатных сердцевин из периферийной (относительно ее положения в структуре ОВ) «кварцевой» части поперечного сечения МСОВ при усилении степени наведенной закрутки.

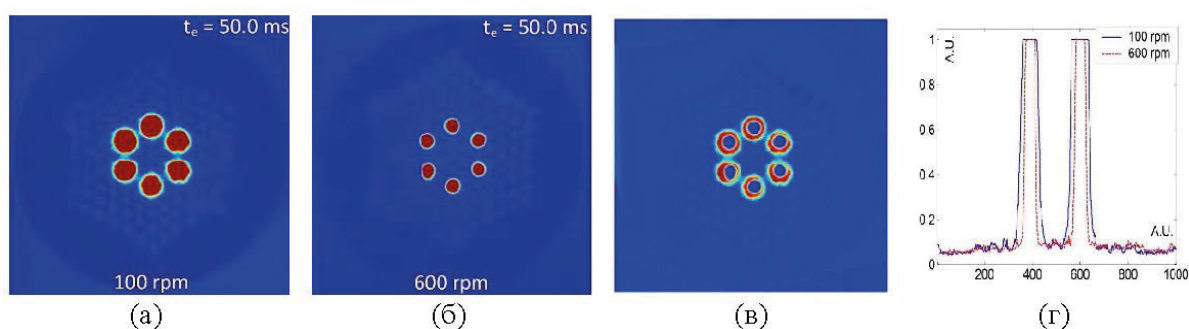


Рис. 2. Профили пучка излучения источника белого света в дальнем поле на выходе 6- GeO_2 -сердцевинных МСОВ: (а) 100 об/м; (б) 600 об/м; (в) и (г) — результаты вычитания

Литература

1. Bourdine A. V., Demidov V. A., Dukelskii K. V., Khokhlov A. V., Ter-Nersesyants E. V., Bureev S. V., Matrosova A. S., Pchelkin G. A., Kuznetsov A. A., Morozov O. G., Nureev I. I., Sakhabutdinov A. Zh., Agliullin T. A., Dashkov M. V., Evtushenko A. S., Zaitseva E. S., Vasilets A. A., Gizatulin A. R., Meshkov I. K., Ismail Y., Petruccione F., Singh G., Tiwari M., Yin J. Six-core GeO_2 -doped silica microstructured optical fiber with induced chirality // *Fibers*. 2023. No. 11(3). P. 28-1–28-18.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПУЧКА ЛАЗЕРА НА ВЫХОДЕ КОМБИНАЦИИ КВАРЦЕВОГО КИРАЛЬНОГО МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОГО СВЕТОВОДА С ПОЛОЙ КОЛЬЦЕВОЙ СЕРДЦЕВИНОЙ И ГРАДИЕНТНОГО МНОГОМОДОВОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА 100/125

*А. В. Бурдин^{1, 2, 3}, А. А. Беляев², М. В. Дашков³, В. В. Демидов¹,
К. В. Дукельский^{1, 2, 4}, А. С. Евтушенко³, Е. С. Зайцева³,
Т. В. Никулина³, С. С. Пашин¹, Е. В. Тер-Нерсисянц¹*

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

³ Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

⁴ Университет ИТМО

e-mail: a.bourdine@goi.ru

Аннотация. В работе представлены результаты измерения профиля пучка лазера в дальнем поле для разных условий возбуждения кварцевого микроструктурированного оптического волокна (МСОВ) с полый GeO₂-легированной кольцевой сердцевинкой (ПКС), к выходу которого было подключено кварцевое градиентное многомодовое ОВ (ММ ОВ) с увеличенным диаметром сердцевины (100 мкм). Исследовались разные условия ввода оптического излучения в ПКС МСОВ — через одномодовое и ММ ОВ 50/125, а также влияние закрутки ПКС МСОВ (0 об/м и 790 об/м) на результирующий паттерн профиля пучка, регистрируемый на выходе описанной комбинации волокон.

Ранее в [1] были представлены впервые изготовленные опытные образцы кварцевых микроструктурированных оптических волокон (МСОВ), успешно объединивших две базовых конфигурации волоконных световодов, уже изначально обладающих уникальными волноводными свойствами: киральные МСОВ (с наведенной в процессе вытяжки закруткой) и МСОВ с полый кольцевой сердцевинкой (ПКС).

В данной работе представлены результаты измерения профиля пучка лазера в дальнем поле при прохождении комбинации указанных ПКС МСОВ (без наведенной закрутки (рис. 1(а), (в)) и с наведенной закруткой 790 об/м (рис. 1(б), (в)) и кварцевых градиентных многомодовых оптических волокон (ММ ОВ) с увеличенным до 100 мкм диаметром сердцевины. Опорные элементы МСОВ — микростержни, капилляры и внешняя опорная труба, а также сама заготовка германосиликатной ПКС изготавливались с применением доступных опорных труб из кварцевого стекла с высоким (более 1000 ppm) содержанием гидроксильных групп (аналог Heraeus Suprasil Standard, Saint-Gobain Spectrosil A/B, Corning HPFS 7980, JGS1, Dynasil 1100/Dynasil 4100, KY-1 (ГОСТ 15130-86)). Заготовка ПКС реализовывалась с помощью MCVD-метода [1], а сама ПКС представляет собой габаритный капилляр с внутренним диаметром 30,5 мкм из кварцевого стекла, легированного GeO₂ в концентрации ~20 мол. % (разность показателей преломления $\Delta n = 0,030$) и толщиной стенок 1,7 мкм. В периферийной части сечения МСОВ размещены 90 воздушных отверстий, распределенных по «классической» гексагональной геометрии: средний диаметр отверстий 2,5 мкм, шаг 7,5 мкм, среднее расстояние от центра МСОВ 14 мкм. Поскольку основное внимание при вытяжке МСОВ было сосредоточено на ПКС, некоторые отверстия в периферийной части деформированы (рис. 1(а), (б)).

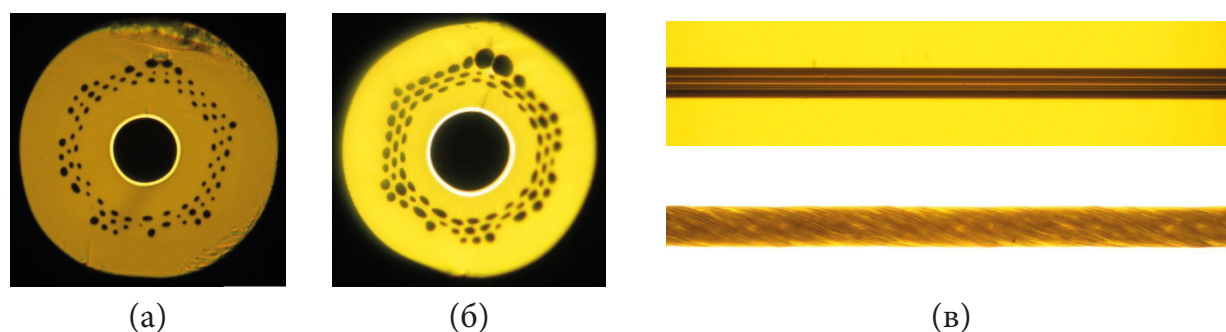


Рис. 1. Фото изготовленных образцов кварцевых ПКС МСОВ: (а) без закрутки; (б) закрутка 790 об/м; (в) продольное сечение

Ввод излучения с выхода источника («красный» лазер $\lambda = 650$ нм) осуществлялся в условиях равномерной радиальной засветки ПКС как через одномодовое (SM ОВ), так и ММ ОВ 50/125 с установленным прецизионным воздушным зазором. И соединение согласующего ОВ со входом ПКС МСОВ, и подключение выхода ПКС МСОВ ко входу ММ ОВ 100/125 выполнялись с помощью прецизионных систем юстировки полевых сварочных аппаратов. Некоторые примеры зарегистрированных в дальнем поле на выходе ММ ОВ 100/125 профилей пучков указанного «красного» лазера при соответствующих условиях ввода в ПКС МСОВ приведены на рис. 2.

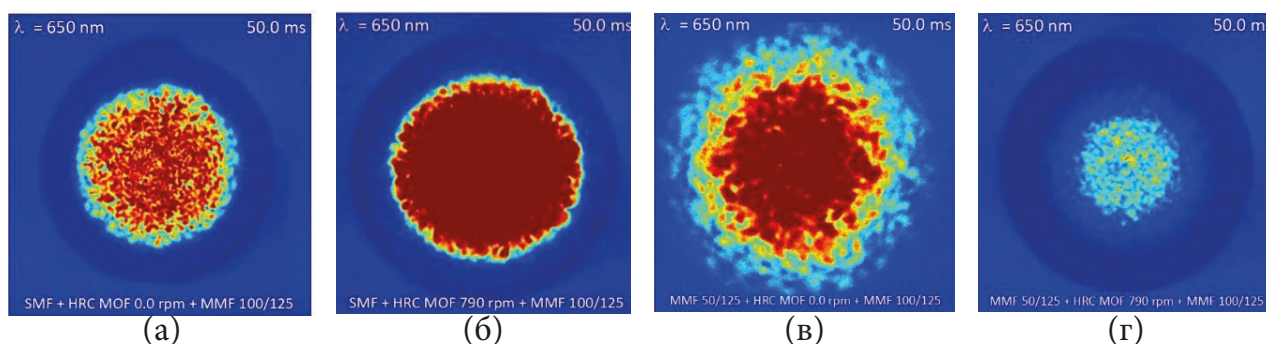


Рис. 2. Профили пучка «красного» лазера в дальнем поле на выходе ММ ОВ 100/125 при возбуждении закрученного/незакрученного ПКС МСОВ через одномодовое ОВ / ММ ОВ 50/125: (а) SM ОВ, 0 об/м; (б) SM ОВ 790 об/м; (в) ММ ОВ 50/125, 790 об/м; (г) ММ ОВ 50/125, 790 об/м

Полученные результаты в целом могут рассматриваться как экспериментальное подтверждение факта существенного влияния наведенной закрутки на итоговую суперпозицию радиального распределения полей мод. Так, усиление киральности приводит к «сжатию»/«фокусировке» последнего, что сохраняет и обеспечивает проекцию структуры суперпозиции полей мод ПКС МСОВ даже после распространения оптического излучения по ММ ОВ 100/125 на детектируемый с выхода этого ОВ спекл (паттерн) профиля пучка лазера.

Литература

1. Bourdine A. V., Demidov V. A., Ter-Nersesyants E. V., Pchelkin G. A., Shurupov D. N., Khokhlov A. V., Matrosova A. S., Kashin A. I., Bureev S. V., Dashkov M. V., Evtushenko A. S., Zaitseva E. S., Gizatuln A. R., Meshkov I. K., Dyavangoudar A. A., Saharia A., Tiawari M., Vasilets A. A., Elagin V. S., Singh G., Dukelskii K. V. Twisted silica few-mode hollow GeO_2 -doped ring-core microstructured optical fiber // Photonics. 2023. No. 10. P. 846-1–846-17.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАДИАЦИОННОСТОЙКИХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ*

С. Е. Барыкина, И. В. Южаков, Д. Д. Салимгареев, А. Е. Львов, Л. В. Жукова

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена разработке поликристаллических волокон на основе монокристаллов галогенидов серебра и таллия, изготовлению волокон оптимального состава и исследованию их свойств. Предложены инфракрасные поликристаллические волокна с оптической оболочкой и без нее на основе фото- и радиационностойких монокристаллов систем $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ и $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlBr}_{0.54}\text{I}_{0.46}$. Получены волокна диаметром 465, 525 и 1120 мкм и длиной до 3,5 м с широким диапазоном пропускания 3,5–28 мкм и низкими оптическими потерями. Это открывает возможность создания волоконно-оптического оборудования среднего и дальнего ИК-диапазона до 28 мкм, в том числе работающего при повышенном радиационном фоне.

Ранее были известны волокна из кристалла состава $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ (КРС-13), обладающие диапазоном пропускания от 2 до 18 мкм и низкими оптическими потерями. Однако они фоточувствительные, а сам материал мягкий и имеет низкую устойчивость к β - и γ -излучению. Также известен кристалл $\text{TlBr}_{0.54}\text{I}_{0.46}$ (КРС-5) [1]. Он фото- и радиационностойкий, однако волокна из него недолговечны, что связано с рекристаллизацией зерен. Для того чтобы получить фото- и радиационностойкие волокна, были получены монокристаллы систем $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ и $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlBr}_{0.54}\text{I}_{0.46}$. Исследование их свойств показало, что на их основе возможно изготовление поликристаллических волокон.

Режимы экструзии были определены посредством моделирования по методу конечных элементов. По результатам моделирования были выбраны температуры 170–200 °С, в зависимости от состава, при скорости $0,30\text{--}0,40 \pm 0,05$ мм/мин. Режимы были апробированы на гидравлическом прессе. Экструзией были получены волокна длиной до 3,5 м, диаметрами 465, 525, 1120 мкм. Каждый световод был помещен в оболочку из фторопласта, торцы срезались специальным стеклянным резцом и помещались в коннекторы SMA-905. Исследование диапазона пропускания выполнялось на ИК-Фурье-спектрометре IR Prestige 21, Shimadzu, с использованием специальной приставки с внеосевыми параболическими зеркалами для подключения ИК-волокон через SMA-905. Так, спектры волокон охватывают область 4–25 мкм в случае состава $\text{Ag}_{0.97}\text{Tl}_{0.03}\text{Cl}_{0.26}\text{Br}_{0.74}$ и 3,5–28 мкм в случае образцов на основе монокристаллов системы $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$. При этом с ростом содержания йодида таллия спектр смещается в область более длинных волн: от 3,5–26,5 мкм для состава $\text{Ag}_{0.97}\text{Tl}_{0.03}\text{Cl}_{0.24}\text{Br}_{0.74}\text{I}_{0.02}$ до 4–28 мкм в случае $\text{Ag}_{0.91}\text{Tl}_{0.09}\text{Cl}_{0.23}\text{Br}_{0.72}\text{I}_{0.05}$.

Литература

1. Yuzhakova A., Lvov A., Salimgareev D., Pestereva P., Yuzhakov I., Kondrashin V., Kabykina E., Kucherenko F., Zhukova L. Optical properties of crystalline materials based on $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ — $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ systems // Ceram. Int. 2024. No. 50. P. 21767–21778.

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Государственный контракт № FEUZ-2023-0021 (H687/42Б.325/23).

ВЛИЯНИЕ СВЯЗИ МОД В ТРАКТОВОМ ВОЛОКНЕ ВОЛС ПРИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ МЕТОДИКЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Д. В. Свистунов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
e-mail: svistunov@mail.ru

Аннотация. Обсуждается допустимая длина линии передачи в зависимости от коэффициента межмодовой связи в волокне. Показано, что связь мод не снижает уровень защиты данных, обеспечиваемый распределительной методикой передачи.

Перспективная распределительная методика передачи данных [1] основана на селективном возбуждении мод в трактовом волокне многомодовой системы. Исходный поток данных предлагается разделять по времени на отрезки, а каждый отрезок — на блоки по числу селективно возбуждаемых мод. Эти блоки проходят индивидуальные линии задержки, которые могут представлять собой петли волокна соответствующей длины. Линии задержки обеспечивают одновременное поступление разных блоков данных на вход трактового волокна, где модовый мультиплексор вводит оптический сигнал каждого блока в отдельную возбужденную моду волокна.

Такая методика направлена на противодействие нелегальному считыванию данных при несанкционированном вторжении в линию. Условие скрытности нелегального вторжения приводит к использованию изгиба волокна или так называемых устройств продольной связи, в которых направления выведенных из волновода или оптического волокна пространственных световых пучков задаются значениями постоянных распространения мод. В результате выведенные из волокна пучки мод соседних порядков перекрываются в пространстве из-за близости величин их постоянных распространения даже при небольшой расходимости этих пучков. Нелегально считанный при использовании таких устройств сигнал является суммарным сигналом всех одновременно переданных блоков данных. В этом суммарном сигнале не представляется возможным ни выделить отдельные блоки из общего переменного сигнала, ни установить правильную последовательность блоков данных в исходном сигнале. В то же время, на приемном конце линии селективным устройством детектируются отдельные моды, и обратным преобразованием линиями задержки восстанавливается исходная последовательность блоков данных.

В многомодовом трактовом волокне существует связь мод, влияющая на условия применения методики. По мере распространения моды в нее перекачивается часть оптической мощности сигналов, передаваемых по соседним модам. Эта перекачанная мощность представляет собой оптический шум для сигнала рассматриваемой моды. Его наличие может заметно ограничивать допустимую длину линии передачи в зависимости от коэффициента межмодовой связи в трактовом волокне.

В докладе обсуждается величина допустимой длины линии в зависимости от коэффициента межмодовой связи. Показано, что наличие межмодовой связи в трактовом волокне не снижает уровень защиты данных в линии, обеспечиваемый распределительной методикой передачи. Шумовые составляющие добавляются в модовые информационные каналы трактового волокна, но суммарный сигнал, регистрируемый при нелегальном вторжении в линию, не изменяется. Этот сигнал по-прежнему остается недоступным для адекватной расшифровки.

Литература

1. *Svistunov D. V.* Selective Mode Excitation: A Technique for Advanced Fiber Systems // Optical Fiber and Wireless Communications / Ed. by R. Roka. Rijeka: InTech, 2017. P. 105–122.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОРОГА ВРМБ В ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ОТ ШИРИНЫ СПЕКТРА НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ SFP-МОДУЛЕЙ

К. А. Захаренков^{1, 2}, А. Н. Сигаев¹

¹ ОАО «СУПЕРТЕЛ»

² Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
e-mail: sigaev_an@supertel.ru

Аннотация. В этой работе представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований эффекта вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна по возможности уменьшения его негативного влияния при передаче оптических сигналов при помощи увеличения ширины спектра несущей частоты.

Эффект вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна (ВРМБ) проявляется в отражении части спектра сигнала обратно, он увеличивает потери сигнала, увеличивает шумы в линии, индуцирует сильные флуктуации в прошедшем сигнале, что вызывает ошибки при приеме сигнала. В результате ограничивается допустимая вводимая мощность в линию и дальность передачи. Это подтверждает ранее опубликованная статья [1], где экспериментально была обнаружена связь между появлением ошибок в линии связи и достижением порога ВРМБ. В этом эксперименте оптические модули различных производителей показывали разное значение порога ВРМБ.

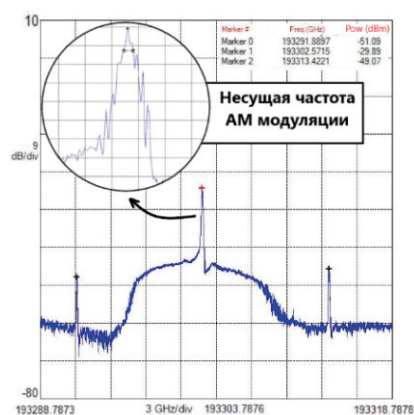
В настоящей работе мы исследовали причины этого явления. Для исследования были использованы те же SFP-модули и волокно G.652D, что и в вышеупомянутой работе, поскольку порог ВРМБ зависит как от параметров излучения, так и от свойств и параметров оптоволокну. Методика измерений была аналогична описанной в [1].

Спектр модулированного по амплитуде сигнала OTU-2 приведен на рис. 1(а). На спектре можно видеть несущую частоту в центре, широкополосный спектр псевдощумового сигнала модуляции вокруг несущей и спектральные составляющие тактовой частоты, симметричные относительно несущей. Были изучены и экспериментально исследованы зависимости порога ВРМБ от ширины спектра несущей частоты. Сделан вывод, что именно этот параметр оказывает основное влияние на величину порога ВРМБ.

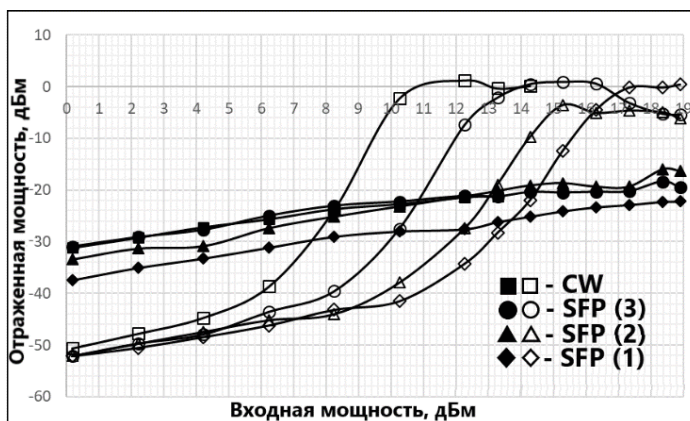
На рис. 1(б) представлены практические результаты измерений рассеянного от входа в волокно сигнала и спектрального анализа различных SFP-модулей. Экспериментальное значение порога ВРМБ было сопоставлено с теоретическими расчетами по формулам в [2] для CW и NRZ модулированных сигналов с учетом коэффициента поляризации (табл. 1).

Таблица 1. Сопоставление экспериментального значения порога ВРМБ с теоретическими расчётами по формулам для CW и NRZ модулированных сигналов с учётом коэффициента поляризации

Лазеры	Средняя ширина спектра по FWHM	Экспериментальный порог ВРМБ	Теоретический порог ВРМБ
CW (0)	<300 кГц	8,40 дБм	8,26 дБм
SFP (3)	17 МГц	10,80 дБм	11,59 дБм
SFP (2)	60 МГц	13,20 дБм	12,64 дБм
SFP (1)	152 МГц	14,40 дБм	14,81 дБм



а)

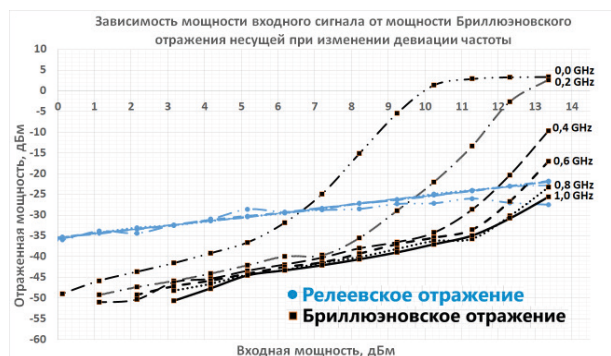


б)

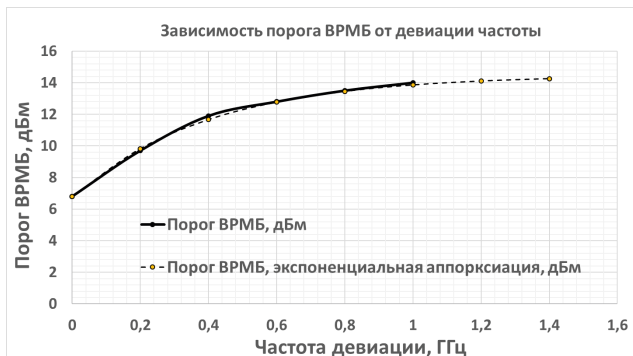
Рис. 1. Спектр прошедшего сигнала (а) и графики зависимости мощностей отраженных релейеской и бриллюэновской составляющих сигнала от подаваемой мощности SFP-модулями различных производителей и лабораторным CW-лазером с полосой менее 300 кГц [1] (б)

Полученные результаты хорошо коррелируют с проведенными ранее исследованиями порога появления ошибок.

На рис. 2 представлены зависимости мощности отраженного сигнала и порога ВРМБ при исследовании рассеяния сигнала одночастотного лазера Keysight 7711A с различной девиацией частоты (рис. 2(а)).



а)



б)

Рис. 2. Зависимости мощности отраженного сигнала от подаваемой мощности в волокно при изменении девиации (а) и порога ВРМБ от величины девиации (б)

Выводы:

1. Различие в порогах ВРМБ для SFP-модулей различных производителей обусловлено разной шириной полосы несущей частоты, которая может быть вызвана чирпом.
2. Расширение полосы несущей может дать увеличение значения порога ВРМБ до 8 дБ.

Литература

1. Мажирова А. А., Сигаев А. Н. Экспериментальная оценка влияния вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюэна на ошибки в канале ВОЛС // Всероссийская науч-

но-техническая и научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей. Сборник лучших докладов: в 2-х т. Т. 1 / сост. Н. Н. Иванов. СПбГУТ: Санкт-Петербург, 5–7 декабря 2023 года. С. 305–309. EDN VXJZBS.

2. *Ļašuks I.* The Effect of Stimulated Brillouin Scattering on WDM-PON // Electronics and Electrical Engineering. 2010. No. 7(103). P. 105–108.

РАЗРАБОТКА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГЕОФОНА

*В. В. Савин, К. А. Коннов, И. Д. Казачкова, И. А. Веремеенко,
А. Ю. Киреев, А. В. Волков, М. Ю. Плотников*

Университет ИТМО, институт «Высшая инженерно-техническая школа»
e-mail: vvsavin@itmo.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки и исследования волоконно-оптического геофона с рабочим диапазоном частот от 1 до 250 Гц.

В настоящее время существует острая необходимость в разработке высокоточных и надежных волоконно-оптических геофонов для донных сейсмических станций, которые позволят осуществлять измерения в области низких частот и повысить качество геологоразведочных работ, проводимых на шельфовых месторождениях полезных ископаемых [1, 2]. Применение волоконных технологий в основе датчиков позволяет получить ряд существенных преимуществ перед пьезоэлектрическими и электродинамическими аналогами: отсутствие необходимости электрического питания и перекрестных помех между сенсорами, широкий динамический диапазон измерений, помехозащищенность, возможность спектрального и временного мультиплексирования.

В ходе работы проведено моделирование волоконно-оптического геофона в ПО COMSOL Multiphysics и разработана конструкция датчика на основе интерферометра Майкельсона (рис. 1). Изготовлен его макет и проведены экспериментальные исследования основных характеристик разработанного устройства. Опрос датчика осуществлялся с применением компенсационного интерферометра.

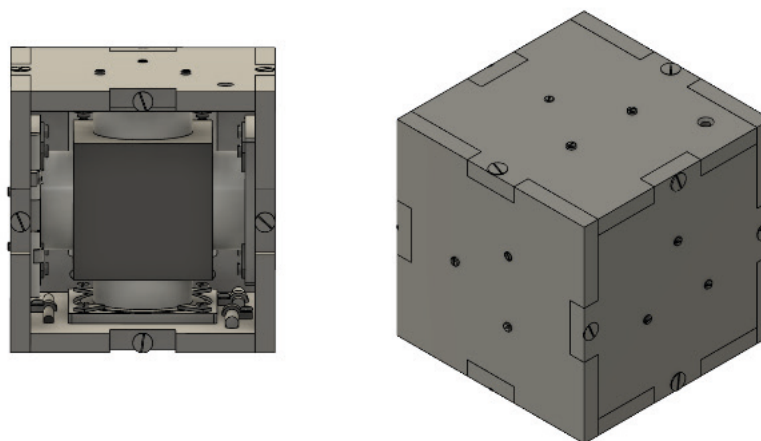


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического геофона

Литература

1. *Chen J. et al. A fiber-optic interferometric tri-component geophone for ocean floor seismic monitoring // Sensors. 2016. Vol. 17. No. 1. P. 47.*
2. *Mo L. et al. A novel three-component fiber-optic geophone for distributed acoustic sensing system // IEEE Sensors Journal. 2023.*

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ГИБКОГО ИНСТРУМЕНТА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЕГО В ПРОСТРАНСТВЕ

С. В. Варжель, У. Р. Коробкова, М. В. Сковородкина, Ю. И. Яндыбаева

Университет ИТМО
e-mail: mvs@itmo.ru

Аннотация. Данная работа демонстрирует возможность определения осевой деформации оптического волокна волоконно-оптическим методом, используя массивы волоконных брэгговских решеток (ВБР). Массивы помещаются вдоль длины кабеля, образуя квазираспределенный датчик формы цилиндра. Математическая модель распределения температуры в чувствительном элементе при изменении температуры окружающей среды в COMSOL Multiphysics иллюстрирует, что меньшее время температурного отклика можно получить при использовании материала полости цилиндра RTV-560.

Разработка и исследование волоконно-оптического датчика определения формы гибкого инструмента актуальна в промышленности, медицине и робототехнике.

В проанализированных аналогах [1, 2] разрабатываемой системы обнаружены следующие недостатки: использование дорогостоящего оборудования, такого как спектроанализаторы, многосердцевинные волокна и оборудование для их опроса, а также необходимость температурной компенсации датчика. Перечисленные недостатки можно устранить, используя предложенную схему волоконно-оптического датчика. Кроме этого, предлагаемая концепция может работать на существенно более высоких скоростях опроса датчика за счет перехода от спектрального метода опроса к амплитудному, что может быть потенциально интересным для некоторых областей применения. В настоящей работе более подробно рассмотрена температурная компенсация датчика.

В качестве чувствительного элемента используется массив ВБР, а гибким инструментом служит кабель с центральным пазом и тремя симметричными пазами вокруг него. В эти пазы помещаются оптические волокна с ВБР. Для иллюстрации работы датчика рассмотрим пару ВБР в центре кабеля и ВБР в верхнем пазе. В состоянии покоя эти ВБР имеют длины волн λ_1 и λ_1^* соответственно. Поскольку брэгговские решетки чувствительны к деформации, при изгибе кабеля ВБР в сердцевине останется на длине волны λ_1 , а ВБР в верхнем пазе растянется. Из-за этого растяжения длина волны λ_1^* сместится в длинноволновую область и станет λ_1^{**} . Зная величину разницы $\Delta\lambda = \lambda_1^* - \lambda_1^{**}$, можно рассчитать осевую деформацию оптического волокна, а следовательно, и кабеля [3]. Результаты моделирования чувствительного элемента позволяют определить предельные размеры чувствительного элемента, материалы, из которого он будет изготовлен, а также подтверждают возможность автоматической температурной компенсации при простой конструкции датчика.

Литература

1. Gander M., MacPherson W., McBride R., Jones J., Zhang L., Bennion I., Blanchard P., Burnett J., Greenaway A. Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre // Electron. Lett. 2000. No. 36. P. 120–121.
2. Davis M., Kersey A., Sirkis J., Friebele E. Shape and vibration mode sensing using a fiber optic Bragg grating array // Smart Mater. Struct. 1996. No. 5. P. 759.
3. Егорова Д. А., Куликов А. В., Мухтубаев А. Б., Плотников М. Ю. Волоконно-оптическая измерительная система для определения положения и изгибов протяженных объектов в пространстве // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 346–352.

ПРИМЕНЕНИЕ КАСКАДА ВОЛОКОННЫХ БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО УЗКОПОЛОСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА

Ю. И. Яндыбаева, В. А. Якимук, Д. В. Калязина,
М. В. Сковородкина, С. В. Варжель

Университет ИТМО
e-mail: iuiandybaeva@itmo.ru

Аннотация. В рамках данной работы рассматриваются метод и особенности создания спектральных фильтров с узкой полосой пропускания (менее 80 пм), центральной длиной волны 1550 нм и большим коэффициентом ослабления (более 40 дБ) на базе системы, состоящей из каскада волоконных брэгговских решеток (ВБР), соединенных друг с другом через оптический изолятор.

Узкополосные фильтры актуальны для задач создания систем квантового распределения ключей на боковых частотах [1] для отсекающей центральной длины волны от боковых максимумов. К таким фильтрам устанавливаются специальные требования: очень узкая полоса пропускания (менее 80 пм) и при этом большое значение ослабления сигнала (более 40 дБ), что является трудновыполнимой задачей. В связи с этим предлагается использовать для таких целей последовательное соединение нескольких ВБР с высоким коэффициентом отражения через оптический изолятор во избежание паразитной интерференции (рис. 1(а)).

Соединение пары ВБР с ослаблением 23,7 и 19,6 дБ позволяет достигнуть суммарной аттенюации 41,6 дБ. При этом ширина спектрального минимума по уровню — 2 дБ — 77 пм (рис. 1(б)). Центральная длина волны полученного фильтра составила 1549,94 нм, однако путем термического воздействия на каждую ВБР ее можно менять. Помещение полученной системы в специальный корпус (рис. 1(а)) позволило создать перестраиваемый фильтр с диапазоном спектральной перестройки 330 пм (≈ 41 ГГц).

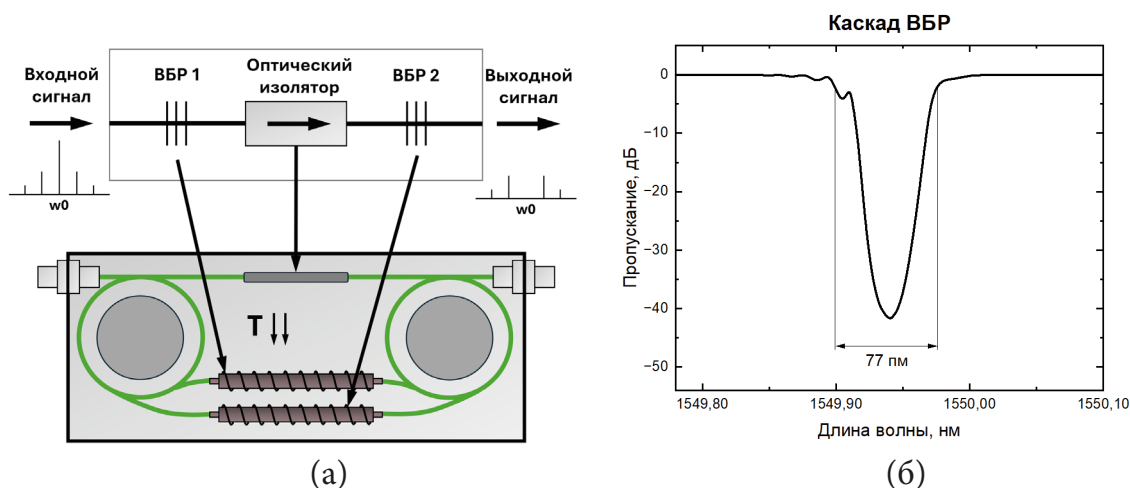


Рис. 1. Схема узкополосного фильтра на каскаде ВБР и конструкция корпуса с технологией перестройки центральной длины волны (а); спектр пропускания системы из двух решеток с оптическим изолятором (б)

Литература

1. Goncharov R., Samsonov E., Kiselev A. D. Subcarrier wave quantum key distribution system with gaussian modulation // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2103. No. 1. P.012169.

МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЙ ФАЗОВЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР С ПРИМЕНЕНИЕМ ГАЛФЕНОЛА

А. В. Васильев, С. А. Волковский, А. С. Алейник

Университет ИТМО
e-mail: vasalvl2017@yandex.ru

Аннотация. В работе представлена модель фазового волоконно-оптического модулятора с применением стержня из галфенола в качестве внешней напрягающей волокно конструкции.

В настоящее время основными типами фазовых модуляторов, применяемых в оптоэлектронных приборах, являются электрооптические модуляторы на основе ниобата лития, а также пьезомодуляторы [1, 2]. Известен эффект магнитострикции, схожий с пьезоэффектом, однако применение магнитострикции для модуляции фазы света мало исследовано. В данной работе предложена конструкция оптического фазового модулятора на основе магнитострикции, построена и исследована его конечноэлементная модель.

На рис. 1 представлена модель конструкции магнитострикционного модулятора фазы.

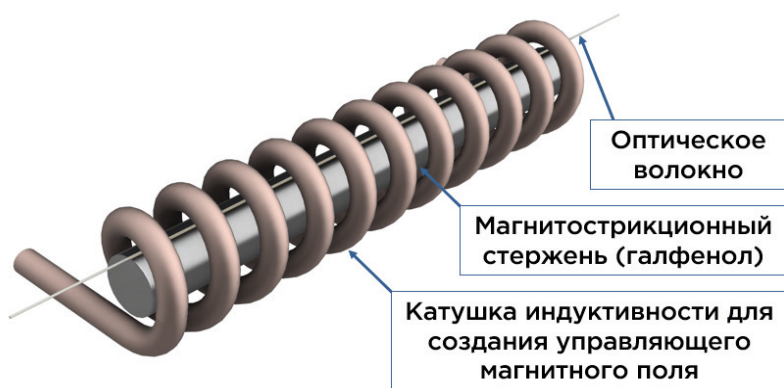


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического магнитострикционного модулятора фазы с использованием галфенола

Фазовый набег, даваемый представленной конструкцией, вычисляется по формулам (1) и (2):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n}{\lambda} (l - l_0), \quad (1)$$

$$\Delta l = \frac{3\lambda_s}{2H_s^2} l_0 H^2, \lambda_s \approx 300 \text{ ppm}, H_s \approx \frac{23,873 \text{ кА}}{\text{м}}, \quad (2)$$

где λ_s — коэффициент магнитострикции;
 H_s — напряженность магнитного поля насыщения для галфенола [3];
 λ — рабочая длина волны оптического излучения,
 n — показатель преломления оптического волокна;
 $l - l_0 = \Delta l$ — удлинение оптического волокна;
 H — напряженность внешнего магнитного поля;
 $\Delta\varphi$ — набег фазы.

Работоспособность конструкции подтверждена экспериментально. Рабочий диапазон частот модуляции лежит в полосе частот от единиц до сотен герц [3].

Литература

1. *Лопатина П. С., Криштон В. В.* Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи // Приборостроение. 2009. № 12.
2. *Imai M., Yano T., Ohtsuka Y., Motoi K., Odajima A.* Wide-frequency fiber-optic phase modulator using piezoelectric polymer coating // IEEE Photonics Technology Letters. 1990. No. 2(10). P.727–729.
3. *Summers E. M., Lograsso T. A., Snodgrass J. D., Slaughter J. C.* Magnetic and mechanical properties of polycrystalline Galfenol // Smart Structures and Materials 2004: Active Materials: Behavior and Mechanics. SPIE, Bellingham, WA, 2004.

ДАТЧИК ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Е. В. Ильин¹, К. Г. Еланская¹, А. И. Сидоров^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² Университет ИТМО
e-mail: evilin@stud.etu.ru

Аннотация. Проведено исследование влияния показателя преломления аналита на спектральные характеристики фотоннокристаллической (ФК) резонансной структуры. Анализ проводился методами численного моделирования. Показано, что чувствительность достигает 855 нм/RIU (Refractive Index Unit). Подобные структуры могут применяться для измерения показателя преломления в микрофлюидных устройствах.

Применение фотонных кристаллов для создания оптических волноводов и резонаторов открывает широкие возможности для разработки компактных и эффективных оптических устройств. Применение прямоугольных резонаторов на основе ФК волноводов и резонаторов позволяет создавать устройства с высокой добротностью, способные эффективно обрабатывать оптические сигналы, а также детектировать характеристики окружающей среды.

Фотонный кристалл представляет собой тонкую пленку кремния, состоящую из кремниевых стержней круглого сечения. ФК резонансная структура сформирована ФК интерферометром Маха — Цендера с ФК гексагональными резонаторами. Численное моделирование проводилось в среде COMSOL Multiphysics [1].

На рис. 1 показаны расчетные спектральные зависимости ФК структуры от показателя преломления аналита. Из рисунка видно, что при увеличении показателя преломления аналита происходит длинноволновый сдвиг резонансной полосы. Спектральная зависимость имеет линейный характер. Чувствительность к изменению показателя преломления составляет 855 нм/RIU.

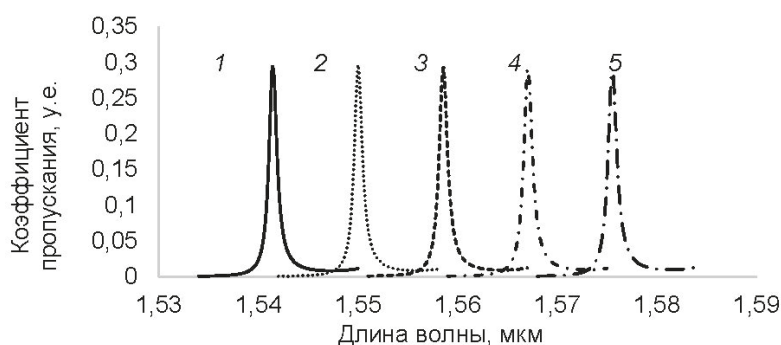


Рис. 1. Спектральные зависимости ФК структуры от показателя преломления n аналита, у.е.:
1 — 1,33; 2 — 1,34; 3 — 1,35; 4 — 1,36; 5 — 1,37

Полученные результаты показывают, что подобные ФК структуры могут быть использованы в качестве датчиков показателя преломления жидких сред в устройствах микрофлюидики.

Литература

1. Nohoji A.-H.-A., Danaie M. Highly sensitive refractive index sensor based on photonic crystal ring resonators nested in a Mach — Zehnder interferometer // Optical and Quantum Electronics. 2022. No. 54. P.6.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УЗКОПОЛОСНОГО ФИЛЬТРА НА ОСНОВЕ 2D ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА

Н. Чуев¹, К. Г. Еланская¹, А. И. Сидоров^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² Университет ИТМО
e-mail: kgelanskaia@etu.ru

Аннотация. Методами численного моделирования показано, что на основе 2D фотоннокристаллического (ФК) квадратного резонатора может быть сформирован узкополосный фильтр. Ширина спектральной полосы пропускания такого фильтра составляет 0,16 нм, а коэффициент пропускания превышает 60 %. Подобные структуры могут применяться для подавления неаксиальных мод полупроводниковых лазеров.

Использование фотонных кристаллов [1] для создания оптических компонентов открывает широкие возможности для разработки компактных и эффективных оптических устройств. Применение фильтров на основе ФК волноводов и резонаторов позволяет создавать устройства с высокой добротностью, пропусканием и существенной локализацией магнитного поля, превышающей значение напряженности источника излучения на несколько порядков.

Фотонный кристалл представляет собой периодически расположенные круглые стержни из кремния. ФК резонатор сформирован удалением стержня между входным и выходным ФК волноводами (рис. 1(а)). Численное моделирование проводилось в среде COMSOL Multiphysics.

На рис. 1(а) показано расчетное распределение поля электромагнитной волны в ФК резонаторе. Из рисунка видно, что при резонансе происходит значительная локализация поля внутри резонатора.

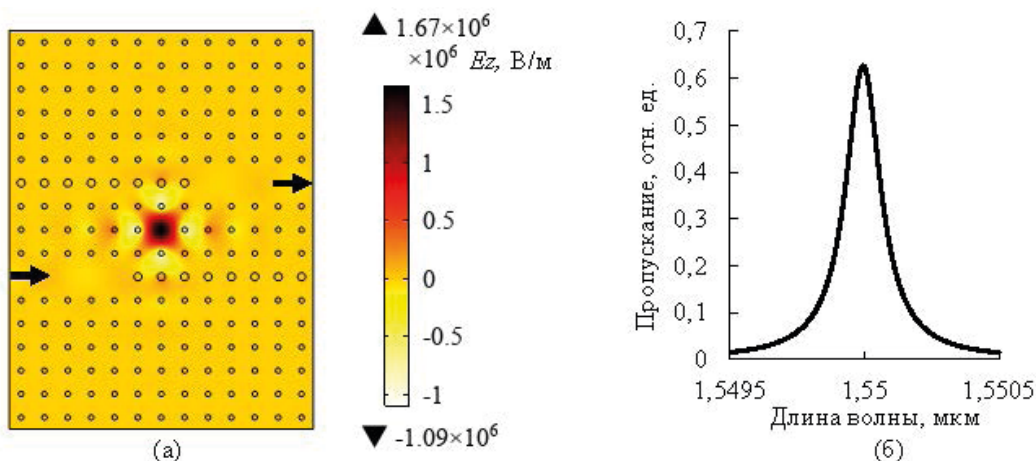


Рис. 1. Геометрия структуры и распределение поля электромагнитной волны в ФК резонаторе (а); спектральная зависимость пропускания резонатора (б)

На рис. 1(б) показана спектральная зависимость пропускания структуры с двумя ФК волноводами и квадратным резонатором вблизи резонанса. Из рисунка видно, что ширина спектральной полосы пропускания такой структуры составляет 0,16 нм, а коэффициент пропускания превышает 60 %. Полученные результаты показывают, что подобные ФК структуры могут быть использованы в качестве фильтров в интеграль-

но-оптических устройствах, а также для подавления неаксиальных мод полупроводниковых лазеров.

Литература

1. Wang Y., Chen D., Zhang G., Wang J., Tao S. A super narrow band filter based on silicon 2D photonic crystal resonator and reflectors // Optics communications. 2016. Vol. 363. P. 13–20.

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ СВЯЗАННЫХ 2D ФОТОННОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

А. Н. Назаров¹, К. Г. Еланская¹, А. И. Сидоров^{1, 2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² Университет ИТМО
e-mail: annazarov@stud.etu.ru

Аннотация. Методами численного моделирования показано, что на основе 2D фотоннокристаллических (ФК) связанных квадратных резонаторов может быть сформирован датчик температуры. Показано, что чувствительность такого датчика равна 0,405 нм/К. Подобные структуры могут применяться для измерения температуры микропроцессоров и интегрально-оптических устройств.

Высокочувствительные оптические датчики и сенсоры могут быть изготовлены из фотонных кристаллов [1]. Такие компоненты оптических систем способны обладать высокой чувствительностью к изменению параметров окружающей среды, в том числе к изменению температуры. Основой подобных датчиков могут служить прямоугольные резонаторные структуры, состоящие из волноводов и областей с локализацией поля — резонаторов.

Фотонный кристалл представляет собой тонкую пленку кремния, состоящую из кремниевых стержней круглого сечения. ФК резонансная структура сформирована четырьмя квадратными ФК резонаторами с электромагнитной связью. Действие датчика основано на изменении показателя преломления кремния, имеющего $dn/dt = 1,62 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$. Численное моделирование проводилось в среде COMSOL Multiphysics. Расчеты проводились в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

На рис. 1 показана расчетная зависимость спектрального положения резонанса фотонного кристалла от температуры. Из рисунка видно, что при увеличении температуры происходит длинноволновый сдвиг резонанса. Чувствительность датчика к изменению температуры составляет 0,405 нм/К.

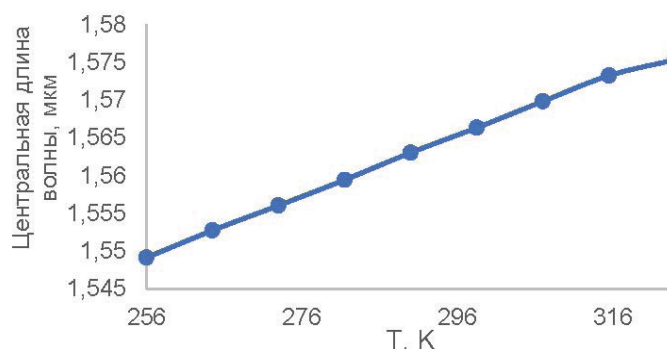


Рис. 1. Расчетная зависимость спектрального положения резонанса фотонного кристалла от температуры

Полученные результаты показывают, что подобные ФК структуры могут быть использованы в качестве датчиков для измерения температуры микропроцессоров и интегрально-оптических устройств.

Литература

1. Radhouene M., Chhipa M. K., Najjar M., Robinson S., Suthar B. Novel design of ring resonator based temperature sensor using photonics technology // Photonic sensors. 2017. No. 7. P.311–316.

Секция 4

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА В РЕЖИМЕ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

П. В. Петров¹, В. В. Сидоров^{1, 2}

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

² АО «Радиовый институт им. В. Г. Хлопина»
e-mail: pavel.petrov@gmail.com

Аннотация. В рамках работы впервые создана установка регистрации сигнала ПЗС-фотоприемника в режиме синхронного детектирования. Значительное увеличение соотношения сигнал — шум позволило исследовать линейность фотоприемника в режиме малых сигналов. Построена теоретическая модель влияния ловушек носителей заряда на линейность прибора, при помощи которой возможно линейризовать его показания.

Техника синхронного детектирования широко применяется при работе с одноканальными фотоприемниками, такими как фотодиоды. Применение этого метода к ПЗС-матрицам осложнено необходимостью демодуляции значительного объема измеряемых данных одновременно со всех пикселей. Эта трудность была нами преодолена посредством написания специализированного высокопроизводительного программного обеспечения. Была собрана установка для измерения сигнала ПЗС-фотоприемника Thorlabs LC100 размером 2048 пикселей в зависимости от освещенности (рис. 1).

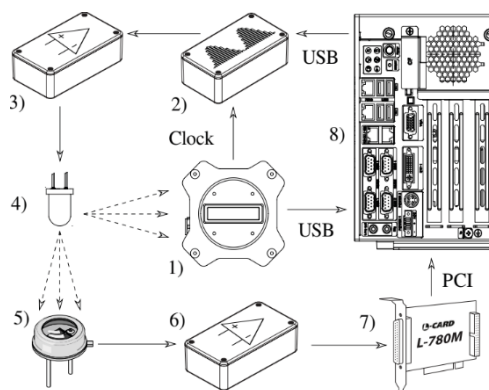


Рис. 1. Схема установки: 1) ПЗС-фотоприемник Thorlabs LC100; 2) модулятор; 3) драйвер светодиода; 4) светодиод; 5) фотодиод; 6) усилитель; 7) АЦП; 8) компьютер

Проведенные измерения показали, что на малых сигналах проявляется нелинейность характеристики, различная для разных пикселей и связанная с наличием в них ловушек для носителей заряда. Для теоретического описания наблюдаемого эффекта была построена модель на основе уравнения электронейтральности [1], формула (1):

$$N_C N_T \exp(E_F / kT) + N_T (\exp(-(E_T + E_F) / kT) + 1) - 1 = p. \quad (1)$$

Посредством решения уравнения были найдены характеризующие нелинейность параметры: энергия уровня ловушек E_T и концентрация ловушек N_T . Используя E_T и N_T как калибровочные коэффициенты, удалось линеаризовать характеристики пикселей.

Литература

1. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ТОЧЕЧНЫХ СЛАБОИЗЛУЧАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

П. А. Меденников, Н. И. Павлов

АО «НИИ оптико-электронного приборостроения»
e-mail: medennik@rambler.ru

Аннотация. Представлен алгоритм обнаружения и сопровождения точечных слабоизлучающих объектов по последовательности изображений, приближающий эффективность традиционных последовательных методов к эффективности методов «Track-Before-Detect».

В системах обнаружения, отслеживания и идентификации объектов, работающих в режиме реального времени на предельных дальностях обнаружения, важным является использование вычислительно эффективных методов и алгоритмов, позволяющих решать поставленные задачи по последовательности кадров (изображений) с низким отношением сигнал/шум. В идеале эффективность таких алгоритмов должна быть приближена к эффективности методов «Track-Before-Detect» («сопровождение до обнаружения»), которые в силу своей огромной ресурсоемкости пока не могут найти применения в системах реального времени.

Предлагаемый в настоящей статье алгоритм, являющийся развитием метода [1], относится к традиционным двухуровневым методам, в которых на нижнем уровне выполняется обработка единичного кадра с выделением отметок потенциальных объектов и оценкой их координат и энергии, а на верхнем уровне — сопоставление кадровых отметок с траекториями отслеживаемых объектов и завязывание новых траекторий для отметок, сопоставление с которыми не произошло. Основная особенность и новизна предлагаемого подхода — оперирование при обработке последовательности кадров с иерархической системой списков объектов: списком целей, инициальным и буферным списками. Расположенный на нижнем уровне иерархии буферный список служит для фильтрации ложных кадровых отметок. Инициальный список предназначен для фильтрации ложных траекторий. В этом списке новые траектории дожидаются выполнения условия статистической достоверности и при его выполнении переносятся в список целей, в котором собираются объекты для отслеживания и оценки характеристик. В зависимости от иерархии списка используются различные правила сопоставления кадровых отметок, правила пересчета траекторных и энергетических характеристик, а также различные условия сохранения объекта в списке.

В результате статистических экспериментов показано, что вероятность обнаружения (вероятность внесения объекта в список целей) растет по мере обработки последовательности кадров. С вероятностью, близкой к единичной, обнаруживаются объекты, для которых вероятность обнаружения на единичном кадре составляет величину 0,22 (количество необходимых кадров для достижения вероятности 0,90 составило 113; для достижения вероятности 0,95 — 128; для достижения вероятности 0,99 — 205).

Литература

1. Меденников П. А., Павлов Н. И. Обнаружение и сопровождение точечных слабоизлучающих объектов на основе анализа последовательности мини-серий изображений // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 12. С. 50–58.

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УСИЛЕНИЕ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В НЕЛИНЕЙНОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ-ПЕРО НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

И. И. Казаков, С. А. Козлов

Университет ИТМО
e-mail: ikazzakov@yandex.ru

Аннотация. Показано, что в беззеркальном нелинейном интерферометре Фабри-Перо на основе пластины ниобата лития возможно многократное дифференциальное усиление терагерцового излучения в поле интенсивной волны накачки той же частоты.

За последнее пятилетие экспериментально обнаружено, что в терагерцовом (ТГц) спектральном диапазоне целый ряд материалов обладает гигантской малоинерционной нелинейностью показателя преломления, в миллионы раз превышающей таковую в этих же материалах в ближнем ИК и видимом диапазонах спектра [1, 2]. Это вызвало большой интерес к изучению возможностей управления параметрами ТГц излучения методами нелинейной оптики [3].

В настоящей работе изучена возможность создания оптического транзистора в ТГц диапазоне, который основан на нелинейном интерферометре Фабри-Перо, способном дифференциально усиливать слабый оптический сигнал. Выведены соотношения, позволяющие определить толщину среды интерферометра L и входную интенсивность ТГц излучения I_0 , которые обеспечивают режим максимального дифференциального усиления слабого ТГц сигнала в интерферометре в поле мощной ТГц волны накачки той же частоты. Показано, что из-за большого линейного показателя преломления и гигантского коэффициента нелинейного показателя преломления некоторых кристаллов в ТГц диапазоне спектра нелинейные интерферометры Фабри-Перо можно использовать в беззеркальном исполнении, только на френелевском отражении излучения от поверхностей кристаллической пластины. Доказано, что беззеркальные интерферометры имеют меньшую чувствительность к вариации толщины по сравнению с зеркальными. Проанализированы особенности нелинейного пропускания интенсивного ТГц излучения пластинами кристаллов ниобата лития.

На рис. 1 проиллюстрировано дифференциальное усиление излучения на частоте 1 ТГц с прямоугольной огибающей с амплитудой 16 МВт/см^2 в поле волны накачки той же частоты с интенсивностью 55 МВт/см^2 в нелинейном интерферометре, представляющем собой плоскопараллельную пластину ниобата лития толщиной $L = 1,25 \text{ мм}$, показатель преломления которой в данном спектральном диапазоне $n_0 = 6,7$, коэффициент нелинейного показателя преломления $n_2 = 7 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{Вт}$, энергетический коэффициент френелевского отражения $R = 0,548$.

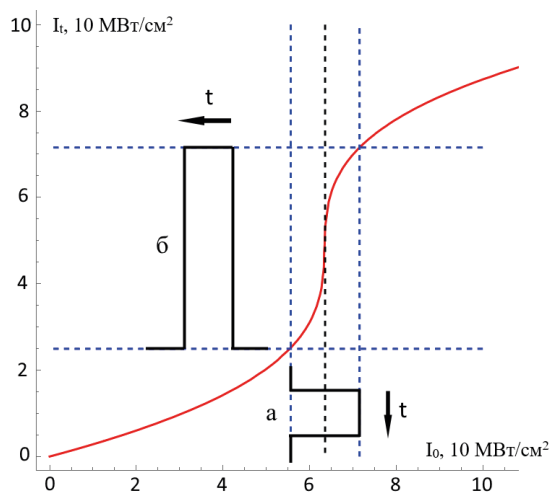


Рис. 1. Схема усиления слабого сигнала в нелинейном интерферометре Фабри-Перо в режиме дифференциального усиления: а — временной профиль импульса на входе в интерферометр; б — профиль импульса на выходе

Из рисунка видно, что амплитуда входного ТГц импульса увеличивается в 3 раза на выходе из интерферометра. Это усиление осуществляется за счет энергии непрерывного мощного ТГц излучения.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность использования в ТГц спектральном диапазоне беззеркального интерферометра Фабри-Перо на основе пластины кристалла ниобата лития в качестве дифференциального усилителя.

Литература

1. Tsyarkin A., Melnik M., Zhukova M. et al. High Kerr nonlinearity of water in THz spectral range // Optics Express. 2019. Vol. 27. No. 8. P. 10419.
2. Nabilkova A., Ismagilov A., Melnik M. et al. Sensitivity Enhancement of Cubic Nonlinearity Measurement in THz Frequency Range // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2024. Vol. 14. No. 5. P. 718–724.
3. Казаков И. И., Гусельников М. С., Козлов С. А. О возможности дифференциального усиления терагерцового излучения в пластине кристаллического кварца в поле волны накачки // Известия РАН. Серия физическая. (Принято в печать).

ПОГРЕШНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

*В. В. Коротаев¹, Г. Н. Маркушин², М. А. Чехов²,
А. Н. Чиванов², В. А. Рыжова¹*

¹ Университет ИТМО

² ПО «Уральский оптико-механический завод имени Э. С. Яламова»

e-mail: korotaev_v_v@mail.ru

Аннотация. Целью работы является уменьшение погрешности стабилизации линии визирования оптико-электронных систем наблюдения путем совершенствования кинематической схемы системы стабилизации и ее конструктивного построения.

Вибрации носителей оптико-электронных систем наблюдения (ОЭСН), например, вертолета или беспилотного летательного аппарата, приводят к размытию изображения, что снижает вероятность обнаружения, распознавания, идентификации объектов [1]. Кроме воздействия вибраций, ОЭСН испытывают также воздействие низкочастотных угловых колебаний, например, качки. Разработан стенд для формирования синусоидальных колебаний, воздействующих на системы стабилизации, и исследования влияния таких колебаний на системы стабилизации линии визирования ОЭСН [2].

Исследован ряд схемных решений систем стабилизации линии визирования ОЭСН [3]: система стабилизации линии визирования на основе двухосевого зеркального гиросtabilизатора; двухосевая система с визирными каналами, установленными на стабилизируемой платформе, и вращающимся зеркалом по углу места; двухосевая система стабилизации платформы с визирными каналами с двойным кардановым подвесом с угломестным и азимутальным приводами подслеживания; система стабилизации платформы с визирными каналами на сферическом подшипнике с угломестным и азимутальным приводами подслеживания [3].

Предложена и исследована новая система стабилизации платформы с визирными каналами на сферическом подшипнике с гиросtabilизированным угломестным и азимутальным приводами подслеживания [4].

Компьютерное моделирование предложенной системы стабилизации показало, что применение корректирующего модуля с передаточной функцией инерциального звена третьего порядка позволяет обеспечить погрешность стабилизации азимутальной оси не более 2,4 угл. сек, а погрешность стабилизации угломестной оси — не более 5,4 угл. сек. Экспериментальные исследования показали, что при угловых колебаниях в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц и при широкополосных случайных вибрациях в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц погрешность стабилизации не превышает 5 угл. сек.

Литература

1. Маркушин Г. Н., Коротаев В. В., Кошелев А. В., Самохина И. А., Васильев А. С., Тимофеев А. Н., Васильева А. В., Ярышев С. Н. Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48.
2. Патент № 2823550 Российская Федерация. С1. Стенд синусоидальных колебаний: опубл. 24.07.2024. Бюл. № 21 / Симановский М. М., Чиванов А. Н., Дедков А. А., Маркушин Г. Н., Кошелев А. В. Правообладатель — АО «ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»».

3. Патент № 2388662 Российская Федерация. Система оптического наблюдения: опубл. 10.05.2010 / Максин С. В., Рассохин В. А., Элинсон В. С., Уманский Б. М., Гилев Ю. В., Дегтярев Н. Г. Правообладатель — АО «ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»».
4. Патент № 2563295 Российская Федерация. Сферический подшипник: опубл. 20.09.2015 / Музыкантов А. В., Можаяев Д. А., Королев В. С., Рыбкин А. А., Ракович Н. С. Правообладатель — АО «ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»».

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНО-ОСЕВЫХ ЗАЗОРОВ В КОМПРЕССОРЕ ДВИГАТЕЛЯ

*Р. А. Кабиев, А. И. Грибаев, Г. П. Мирошниченко,
А. П. Малмакин, А. В. Васильев, Д. И. Егоров, И. К. Мешковский*

Университет ИТМО
e-mail: mega.kabiev@yandex.ru

Аннотация. В настоящей работе представлен разработанный макет волоконно-оптического датчика измерения радиально-осевых зазоров. Проведено моделирование волоконно-оптической схемы датчика и показаны исследования его характеристик.

На рис. 1 представлен полированный конец зонда, устанавливаемого непосредственно в области измерения. Принцип работы датчика основан на регистрации отраженного сигнала и подробно рассмотрен в статьях [1, 2, 3]. Центральный волновод обеспечивает передачу света от высокостабильного лазера до контролируемой поверхности, шесть волокон, расположенные по диаметру, передают отраженный сигнал к фотоприемнику.



Рис. 1. Полированный торец зонда

Исходя из максимально допустимой скорости вращения предполагаемого рабочего колеса компрессора и геометрии лопаток, были выбраны аналого-цифровые преобразователи с рабочей частотой 10 МГц и разрешением 8 бит, что позволяет обеспечивать измерение зазора в реальном времени. Алгоритм обработки и передачи данных реализован с применением программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Проведено исследование влияния вида поверхности на форму кривой интенсивности на механически обработанной стали и серебряном зеркале, а также исследовано воздействие электроники при регистрации промодулированного сигнала с частотой 100 кГц и скважностью 10 % и 4 % лазерного излучения.

Калибровка датчиков выполнена с помощью моторизированной линейной подвижки. Экспериментально подтверждена возможность регистрации зазора в рабочем диапазоне 1200 мкм с погрешностью 50 мкм.

Литература

1. *García I. et al. An optical fiber bundle sensor for tip clearance and tip timing measurements in a turbine rig // Sensors. 2013. Vol. 13. No. 6. P.7385–7398.*
2. *Binghui J. et al. An optical fiber measurement system for blade tip clearance of engine // International Journal of Aerospace Engineering. 2017. Vol. 2017.*
3. *Стешаков Е. Г., Молокович И. Н. Измерение радиального зазора в компрессорных машинах волоконно-оптическим методом // Авиационные двигатели. 2020. № 1. С. 65–70.*

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММИРУЕМОГО МОТОРИЗОВАННОГО АТТЕНЮАТОРА ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д. В. Калязина, И. М. Куцый, А. В. Васильев, С. В. Варжель

Университет ИТМО
e-mail: zina.koliazina@gmail.com

Аннотация. В этой работе представлена модель устройства оптического attenuатора для ультрафиолетового лазерного излучения, генерируемого эксимерными лазерными системами с излучением длиной волны 248 нм. Изделие также обладает функцией стабилизации энергии излучения при длительных экспозициях.

В настоящее время эксимерные лазерные системы применяются во многих сферах, таких как системы лазерной абляции, фотолитография, а также системы записи волоконных брэгговских решеток. Для большинства применений требуется как прецизионный контроль среднего уровня энергии в импульсе, так и стабильность этого уровня. Однако существующие на сегодняшний день эксимерные лазерные системы не обладают достаточной стабильностью ввиду того, что энергия генерации зависит от температуры и давления газовой смеси, которые, как правило, повышаются в процессе работы. В свою очередь, концентрация галогена (хлор, фтор) в газовой смеси снижается в процессе работы системы, что приводит к уменьшению энергии генерации [1].

Разрабатываемое устройство создано для контроля и регулирования энергии (мощности) излучения на выходе, оно оборудовано системой ослабления излучения, зависимость пропускания attenuирующего оптического элемента от угла поворота представлена на рис. 1.

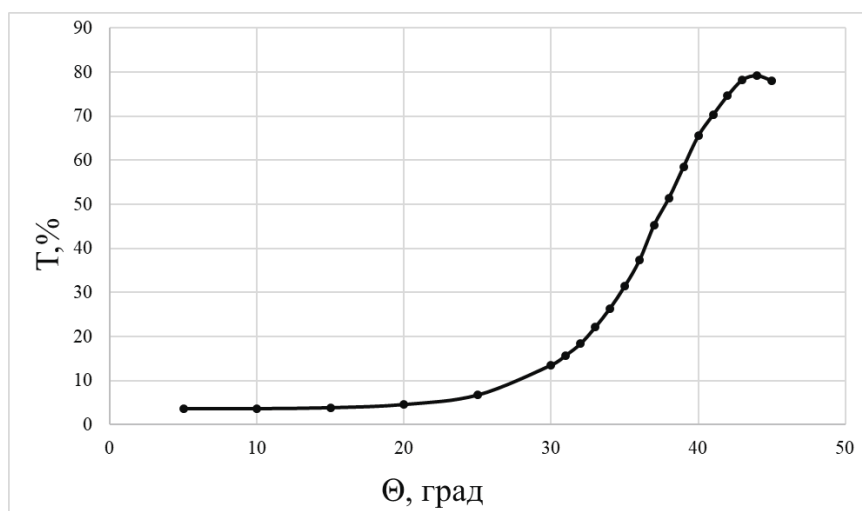


Рис. 1. Угловая характеристика attenuирующего элемента

Также устройство оборудовано системой измерения значения энергии в импульсе и специальным программным обеспечением, позволяющим стабилизировать уровень энергии на выходе в течение длительных временных интервалов.

Литература

1. Грибаев А. И. Создание метода и оптического комплекса для записи массивов
2. высокоэффективных волоконных решеток Брэгга: дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.05. Санкт-Петербург, 2018.

НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ ФОТОПРИЕМНИКИ НА ОСНОВЕ АНТИМОНИДА ГАЛЛИЯ

*А. А. Пивоварова, Е. В. Куницына, И. А. Андреев, Г. Г. Коновалов,
Э. В. Иванов, Н. Д. Ильинская, Ю. П. Яковлев*

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН
e-mail: Pivovarova.antonina@iropto.ioffe.ru

Аннотация. В работе представлены созданные нами неохлаждаемые быстродействующие фотоприемники на основе гетероструктур GaSb/GaAlAsSb для регистрации импульсного инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 0.9–1.8 мкм. Емкость фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 300 мкм составляла 115–135 пФ без смещения и 62–70 пФ при обратном смещении 1.5 В, быстродействие достигало значений $\tau_{0.1-0.9} = 42-60$ нс.

Быстрое развитие оптоэлектронных систем приводит к необходимости разработки быстродействующих ИК-фотоприемников. В волоконно-оптических линиях связи и волоконных телекоммуникационных системах используются длины волн 1.3 мкм и 1.55 мкм, вблизи которых располагаются второе и третье окна прозрачности оптического волокна. Для этих длин волн существуют источники когерентного и спонтанного излучения [1, 2]. Регистрация импульсного излучения лазеров и светодиодов в ближнем и среднем ИК-диапазонах остается одной из важных проблем лазерной физики и импульсной фотометрии.

В настоящее время широко применяются фотоприемники на основе гетероструктур InGaAs/InP, в активной области которых используется прямозонный твердый раствор $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, имеющий, по сравнению с непрямозонным германием, больший коэффициент поглощения на длине волны 1.55 мкм и более низкую собственную концентрацию носителей заряда [3]. Нами созданы pin-фотодиоды на основе GaSb, отличительной особенностью которых является низкая концентрация носителей заряда в активной области, низкая емкость и, соответственно, высокое быстродействие.

Гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb для создания pin-фотодиодов выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках n-GaSb(100), легированных Te. Активная область GaSb была получена с использованием свинца в качестве нейтрального растворителя с целью снижения концентрации природных акцепторов вплоть до $n = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. На основе выращенных гетероструктур методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы чипы размером 500×500 мкм. Фоточувствительная площадка изготовленных приборов имела форму капли.

Исследование вольт-фарадных характеристик показало, что емкость фотодиодов с диаметром чувствительной площадки $d = 300$ мкм имеет величину $C = 62-70$ пФ при обратном смещении $U_{\text{rev}} = 1.5$ В. Быстродействие фотодиода исследовалось с помощью InGaAsP/InP лазера с длиной волны излучения $\lambda = 1.55$ мкм.

Продemonстрировано экспериментально, что созданные фотодиоды могут использоваться без охлаждения для регистрации импульсного излучения лазеров и светодиодов в ближней ИК-области спектра. Созданные GaSb/GaAlAsSb фотоприемники также могут найти применение для решения задач экологии, медицины, для фармацевтического и химического анализа.

Литература

1. Hou L., Tang S., Hou B., Liang S., Marsh J. H. H. 1.55 μm AlGaInAs/InP Sampled Grating Laser Diodes for Mode Locking at Terahertz Frequencies // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2018. No. 24(6). P. 1102508.
2. Bajo M. M., Guzmán A., Trampert A., Hierro A. 1.3 μm emitting GaInNAs/GaAs quantum well resonant cavity LEDs // Solid-State Electron. 2010. No. 54(4). P. 492.
3. Чистохин И. Б., Журавлев К. С. СВЧ-фотодетекторы для аналоговой оптоволоконной связи // Успехи прикладной физики. 2015. № 3(1). С. 85.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУРЬЕ-ОБРАЗОВ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ*

К. Н. Белов¹, А. В. Коржов¹, Н. Д. Кундикова^{1, 2}, П. В. Лонзингер¹,
В. И. Сафонов¹, В. А. Сурин¹, М. А. Ческидова¹

¹ Южно-Уральский государственный университет

² Институт электрофизики УрО РАН

e-mail: belovkn@susu.ru

Аннотация. В данной работе представлена экспериментальная установка для получения Фурье-образов прозрачных объектов сложной формы в проходящем свете, в которой Фурье-образ находится путем математических преобразований изображения объекта. По сравнению с установкой, в которой Фурье-образ получают для простых объектов с использованием 4F-схемы, отмечено снижение уровня шума (среднеквадратичное отклонение составило 1,04, что меньше в 2,75 раза).

Дефекты в прозрачных объектах могут ухудшать их физические свойства. Выявление дефектов в прозрачных объектах техническим зрением по их исходному изображению может быть затруднено по причине малой контрастности дефекта на фоне элементов объекта. Фурье-преобразование эффективно применяется для обнаружения дефектов в объектах с периодической структурой, а также при анализе снимков биологических тканей [1, 2]. Свойства Фурье-преобразования позволяют предположить, что обработка на его основе изображений прозрачных объектов сложной формы при наличии в них дефектов может решить проблему повышения контрастности дефектов для их дальнейшего обнаружения методами технического зрения.

Получение Фурье-образов оптическим методом с их различными модуляциями с использованием 4F-схемы рассмотрено в [2]. Оно применимо для простых объектов, геометрия которых не предполагает значительного преломления поступающего параллельного пучка света [3]. Для прозрачных объектов сложной формы применение данного метода представляется неэффективным, поскольку при этом требуется увеличение количества элементов в установке, повышается ее стоимость и требования к юстировке, а также увеличивается шум в изображении.

Фурье-изображения прозрачного объекта сложной формы могут быть получены путем математического преобразования его прямого изображения. Одна из принципиальных схем применяемой при этом установки представлена на рис. 1а. Установка состоит из равномерного источника света (белый свет, квадрат 300 мм, 2350 Лм), исследуемого прозрачного объекта, камеры для регистрации (камера THORLABS DCU223C, объектив 25 мм) прямого изображения и ЭВМ с программным обеспечением, позволяющим производить Фурье-преобразование изображения.

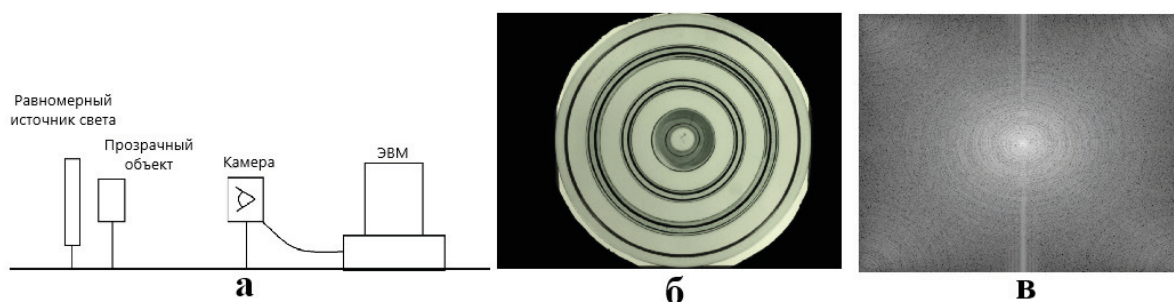


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а); изображение прозрачного объекта сложной формы (б); Фурье-образ изображения в логарифмическом масштабе (в)

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FENU-2023-0025).

На рис. 1б и 1в представлены изображение прозрачного объекта сложной формы (стеклянная деталь изолятора ПС-70Е) в проходящем свете и его Фурье-образ в логарифмическом масштабе, полученный путем математических вычислений на ЭВМ. Для оценки качества Фурье-образа на рис. 1в сравним его уровень шума с аналогичным показателем Фурье-образа объекта простой формы, полученным оптическим методом [3]. Для представленного на рис. 1в Фурье-образа для монотонной области размером 30×30 пикселей среднеквадратичное отклонение составляет 1,04 (для изображения из [4] оно равно 2,86). Яркость изображений при этом приведена к одинаковому уровню. Таким образом, в соответствии с методикой из [4], уровень шума рассматриваемой установки меньше в 2,75 раза по сравнению с установкой на основе 4F-схемы, что говорит о большей ее эффективности и пригодности для проводимых исследований.

Литература

1. *Du-Ming T., Shih-Chieh W., Wei-Chen L.* Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction // *Solar Energy Materials & Solar Cells*. April 2012. P. 250–262.
2. *Yelleswarapu C. S., Kothapalli S., Rao D. V. G. L. N.* Optical Fourier techniques for medical image processing and phase contrast imaging // *Opt. Commun.* 2008. No. 281. P. 1876–1888.
3. *Коржов А. В.* Выявление взаимосвязей между наличием дефектов в прозрачных объектах из аморфных материалов и их электрофизическими свойствами на основе анализа цифровых изображений объектов // *Научные разработки ЮУрГУ — 2023: альманах*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2024. С. 34–35.
4. *Марчук И. В.* Сравнительный анализ результатов восстановления изображений двумерным методом размножения оценок и его модификаций / И. В. Марчук, В. В. Воронин, А. И. Шерстобитов // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. Уфимский государственный университет экономики и сервиса. 2010. Т. 1. № 1. С. 26–34.

О ПРИМЕНЕНИИ ФУНКЦИИ ЧИРПА ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СИСТЕМ СВЯЗИ

И. Л. Виноградова¹, Е. Ю. Головина², Я. М. Косцов¹

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

² Институт нефтепереработки и нефтехимии ФГБОУ ВО «УГНТУ» в г. Салавате
e-mail: egolovina82@mail.ru

Аннотация. В работе представлен подход к построению оптического информационного канала, управление в котором осуществляется посредством функции чирпа. Для его реализации используются специализированные оптические компоненты.

В ряде современных систем связи (IoT, IIoT, SDN) имеет место значительное увеличение процессов обмена информацией — в основном между техническими объектами. Это автоматизированное управление беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), телеметрия подвижных объектов и т.д., что повышает требования по скорости обработки сигналов. Обеспечить последнее можно, в частности, если перенести процессы управления на нижестоящие уровни OSI [1], на физический уровень. В этом случае представляет интерес применение метода передачи управляющей информации в самом сигнале [2] — *нереляционного управления*, особенно если метод будет основан на процессах физического уровня. В оптическом канале нереляционное управление можно реализовать, если в оптическом импульсном сигнале задействовать дополнительное свойство/параметр физического уровня под передачу информации управления, которая затем будет использована, например, в радиосегменте [3]. Особый интерес представляет случай, когда такой параметр не относится к традиционно используемым в телекоммуникациях, что, соответственно, позволит сэкономить телекоммуникационный ресурс или вовсе не задействовать его под нужды управления.

В качестве такого параметра на ВОЛП с амплитудно модулированными сигналами предложено использовать *функцию чирпа оптических импульсов* [3], или *функцию изменения мгновенной длины волны оптического сигнала* (ФИМД). В [3] предложен вариант построения принципиальной оптической схемы управления фазированной антенной решеткой (ФАР) посредством ФИМД, содержащей специализированные оптические компоненты. Управление ФАР неизбежно потребует дополнительного канала управления, а в предложенном методе [3] управляющая информация передается скрытно и без задействования традиционного телекоммуникационного ресурса, так как ФИМД в волоконно-оптическом канале не используется для передачи информации и не воспринимается приемником. Метод [3] дополнительно позволяет перенести часть служебных функций из радиосегмента на оборудование, расположенное «на земле». Если радиосегмент обслуживает рой (рои) БПЛА, то упрощение аппаратуры и снижение энергетики взаимодействия на летающей сети является весомым положительным фактором, учитывая значительную динамику перемещения объектов.

Для функционирования канала управления посредством ФИМД авторами разработаны следующие компоненты: преобразователь ФИМД → амплитуда [4] и интерференционный волоконно-оптический разделитель [5]. На рис. 1 представлена схема RoF-сегмента, реализующая предлагаемый метод.

радиофотонными системами // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2019. Т. 22. № 4-2. С. 129–137.

5. Патент на полезную модель RU 163995 U1, 20.08.2016. Заявка № 2016103991/28 от 08.02.2016. Устройство для разветвления и чирпирования оптических сигналов, опубликовано 20.08.2016 / Абдрахманова Г.И., Андрианова А.В., Виноградова И.Л., Грахова Е.П., Зайнуллин А.Р., Ишмияров А.А., Мешков И.К., Султанов А.Х., Чириков Р.Ю.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МИКРОКЛАССА

Г. В. Гасич, И. М. Зайцев, С. С. Орешечкин, С. В. Якубовский

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»
e-mail: s.oreshechkin@zenit-kmz.ru

Аннотация. В настоящее время на мировом и отечественном рынках дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наблюдается большой спрос на малогабаритную оптико-электронную аппаратуру (ОЭА), особенно для космических аппаратов (КА) микрокласса, таких как формат «CubeSat», что объясняется низкой себестоимостью и высокой ликвидностью такой аппаратуры, как и ее серийного производства. Однако ряд некоторых технологических и массогабаритных ограничений, свойственных данному классу ОЭА, требует более тщательного подхода к выбору и анализу ее технических характеристик.

Причиной возросшего интереса к ОЭА ДЗЗ для КА микрокласса является возможность создания на их основе многосоставной спутниковой группировки, базирующейся на низких околоземных орбитах (300–450 км), в достаточно короткие сроки по сравнению с крупногабаритной аппаратурой. Например, спутниковая группировка ОЭА ДЗЗ «Flock» американской компании Planet, насчитывающая более 200 космических аппаратов, была создана менее чем за 5 лет. На отечественном рынке ДЗЗ группировок такого класса на текущий момент не существует, поэтому авторами в данной работе проведен анализ и сформированы наиболее оптимальные с точки зрения получения наилучшего (с высоким разрешением) качества изображения тактико-технические характеристики (ТТХ) ОЭА ДЗЗ для КА микрокласса.

Ввиду массогабаритных ограничений КА микрокласса использование активных систем управления движением, стабилизации и навигации в их составе является технологически довольно трудно реализуемой задачей, поэтому использование ПЗС-матриц, работающих в режиме ВЗН и требующих точного согласования скорости движения аппарата и скорости движения изображения, нецелесообразно. Применение КМОП-матриц для КА микрокласса позволит существенно повысить эффективность целевой аппаратуры, установленной на борту. Авторами рассмотрены доступные отечественному потребителю КМОП-матрицы. Широко распространены матрицы с размером пикселя от 3,2 до 5,5 мкм. Анализ выполненных расчетов показывает, что процесс проектирования ОЭА ДЗЗ для КА микрокласса становится менее трудоемким, если среди доступных образцов выбирается матрица с наибольшим размером пикселя. Помимо этого, в настоящей работе проведены исследования по выбору оптимальной оптической схемы объектива ОЭА. С целью облегчения сборки и юстировки оптических элементов схемы и получения унифицированного, но при этом технологичного системотехнического решения, предназначенного для серийного производства, наиболее рациональным является применение центрированных (осесимметричных) зеркальных и зеркально-линзовых оптических схем типа Кассегрена, Ричи-Кретьена, Грегори, а также Максудова и Клевцова, включая их разновидности. Особенностью оптической схемы объектива ОЭА ДЗЗ для КА микрокласса является сравнительно малый диаметр входного зрачка (до 90 мм), что влечет за собой повышение светосилы системы (относительное отверстие объектива не менее 1:5). Одновременно с этим требованием проведенные авторами аналитические расчеты, учитывающие, помимо размера пикселя, и другие характеристики КМОП-матрицы (частоту считывания строк, режим работы, величину сигнала с элемента, рабочий спектральный диапазон и спектральную

чувствительность, квантовую эффективность, глубину потенциальной ямы и др.), установили зависимость фокусного расстояния объектива ОЭА от высоты орбиты КА: чем больше значение требуемой высоты орбиты, тем больше значение фокусного расстояния объектива, что ведет к понижению светосилы системы. Таким образом, рациональный подбор и целесообразное комбинирование исходных параметров при расчете ТТХ ОЭА ДЗЗ для КА микрокласса является ключевым фактором, способствующим получению аппаратуры с более высоким разрешением.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ

А. И. Салихов, А. А. Шаймухаметов

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
e-mail: salikhovaydar@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты разработки конструкции корпусированного волоконно-оптического датчика деформации, предназначенного для непрерывного мониторинга строительных конструкций, зданий и транспортных сооружений.

В большей степени инструментами для контроля за напряженно-деформированным состоянием железобетонных строительных конструкций являются тензометрические и струнные датчики деформации [1]. Для обнаружения трещин используют датчики акустической эмиссии [2]. Контроль пространственных перемещений осуществляют с помощью инклинометров. Известные конструкции волоконно-оптических датчиков деформации, применяющие брэгговские решетки в качестве чувствительного элемента, не имеют возможности подстройки степени натяжения датчика после закрепления на объекте наблюдения.

Предложена конструкция волоконно-оптического датчика деформации, предусматривающая контролируемое преднапряжение непосредственно после установки на объекте наблюдения. Это позволяет обеспечить равнозначность первоначальных состояний большого количества датчиков при комплексном обследовании зданий и транспортных сооружений. Конструкция разработанного датчика представлена на рис. 1.

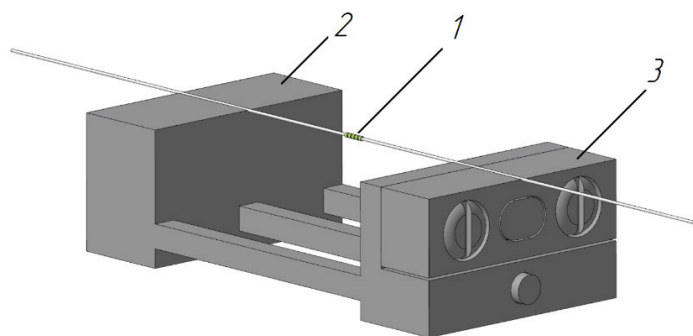


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического датчика деформации ВОДДн-v1.03:

1 — чувствительный элемент датчика; 2 — корпус; 3 — подвижная каретка

Разработаны конструкторская документация и инструкция по калибровке датчика непосредственно после закрепления на объекте наблюдения. Получены результаты испытаний прототипа корпусированного датчика в лабораторных условиях.

Литература

1. Салихов А. И. Роль эксперимента в проектировании строительных конструкций / А. И. Салихов, А. А. Шаймухаметов // Вестник молодого ученого УГНТУ. 2022. № 4(20) [Электронный ресурс]. URL: <https://smu.rusoil.net/files/VMU/VMU-2022-4.pdf> (дата обращения: 15.09.2024).
2. Никитина Н. Е. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин / Н. Е. Никитина, С. В. Казачек // Вестник научно-технического развития. 2010. № 4(32) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=408> (дата обращения: 15.09.2024).

НЕКРИТИЧНАЯ ПО ГЛУБИНЕ РЕЗКОСТИ МИКРОСКОПИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕТА

А. М. Вьюнышев^{1, 2}, Н. Н. Давлетшин^{1, 2}, А. С. Чиркин³

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

² Сибирский федеральный университет

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

e-mail: vyunishev@iph.krasn.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследования визуализации микроскопических объектов на основе анализа пространственных корреляций интенсивности света. Произведен анализ качества изображений и глубины резкости оптической системы.

Современные методы оптической микроскопии позволяют исследовать морфологические и физиологические характеристики живых тканей и клеток. Одной из ключевых проблем оптической микроскопии является ограничение глубины резкости оптической системы, в пределах которой обеспечивается высокое пространственное разрешение. Изображения элементов, находящихся вне области резкости, испытывают размытие и деградацию.

В работе предложен новый метод оптической микроскопии на основе принципа фантомных изображений — фантомной микроскопии. Метод фантомной визуализации использует пространственную корреляцию световых пучков [1]. Один из них взаимодействует с объектом, но регистрируется не обладающим пространственным разрешением детектором. Изображение объекта реконструируется с помощью второго пучка, не взаимодействующего с объектом, путем измерения взаимной корреляции интенсивностей пучков. На рис. 1 представлена схема метода и результат восстановления изображения. Показано, что качество восстановленного изображения слабо зависит от положения второго объектива в плече зондирования, что указывает на высокую нечувствительность по глубине резкости.

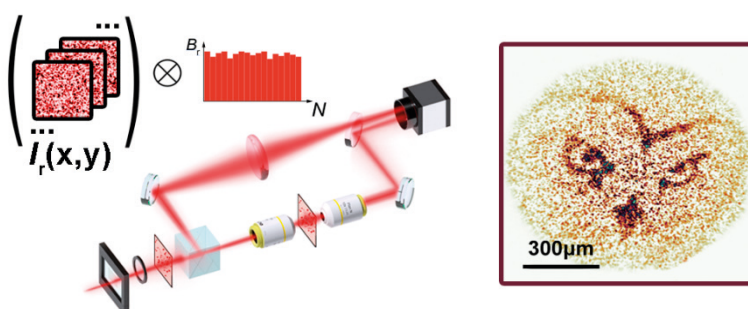


Рис. 1. Схема оптической микроскопии на основе взаимной пространственной корреляции интенсивности света и результат восстановления изображения

В докладе сообщаются результаты исследований визуализации микроскопических объектов методом фантомной микроскопии, включающих анализ качества полученных изображений и глубины резкости, характерной для данного типа визуализации. Полученные результаты демонстрируют новые возможности для 3D-визуализации микроскопических объектов.

Литература

1. Bromberg Y., Katz O., Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector // Physical Review A. 2009. No. 79. P 053840.

ИМИТАЦИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ УДАЛЕННОГО ОБЪЕКТА ПРИ ПРОВЕРКЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КООРДИНАТОРА

Н. Г. Кувшинов, А. В. Нужин, В. В. Пронин

АО «НИИ ОЭП»
e-mail: wwp-niiki@rambler.ru

Аннотация. Рассматривается вариант проверки оптико-электронного координатора с помощью коллиматора. Фокальный узел [1] коллиматора предусматривает как перемещение источника, так и плавное изменение его размера [2] в процессе проверки.

В данной работе для изменения размера источника предлагается использовать моторизованную диафрагму, дополнив фокальный узел зеркальной системой переноса изображения, свободной от хроматических аберраций. Если такая система будет работать с увеличением $(0,2...0,25)^{\times}$, то для создания в фокальной плоскости малых изображений диафрагмы саму диафрагму нужно будет закрывать на величину $(250...1250)$ мкм, при которой погрешности изготовления самой диафрагмы будут сказываться существенно меньше. Дополнительным требованием к этой системе является отсутствие центрального экранирования.

Схема фокального узла с такой оптической системой представлена на рис. 1.

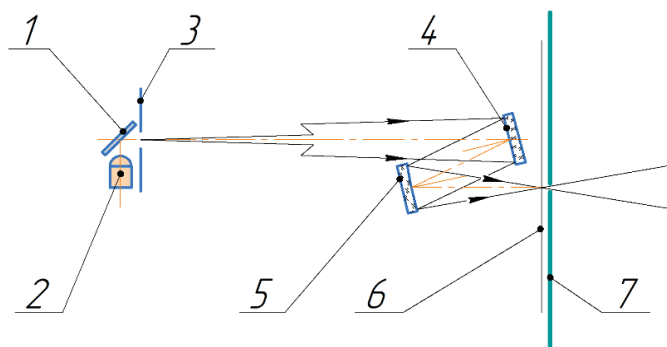


Рис. 1. Схема фокального узла с зеркальной системой переноса изображения:

1 — тепловой источник; 2 — светодиод видимого диапазона; 3 — ирисовая моторизованная диафрагма; 4 и 5 — сферические зеркала; 6 — фокальная плоскость объектива коллиматора; 7 — экран

Приводятся результаты экспериментов на стендовом оборудовании при использовании коллиматора, построенного на базе внеосевого параболического зеркала.

Макет координатора, используемый в эксперименте, содержал два независимых канала с отдельными объективами и матричными приемниками для видимой и ИК-области спектра.

Результаты экспериментов подтверждают выполненные расчеты и свидетельствуют о незначительном искажении формы изображения диафрагмы, обусловленном влиянием аберраций зеркальной системы переноса изображения.

Литература

1. Шарловский Ю. В. Механические устройства малых оптических систем. М.: Машиностроение, 1979. 128 с.
2. Патент № 215046 Российская Федерация. Источник излучения в видимой и инфракрасной областях спектра, опубликовано 28.11.2022 / Нужин А. В., Пронин В. В. 2022. Бюл. № 34.

УСТРОЙСТВО КОЛЛИНЕАРНОГО ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ С АКТИВНЫМ УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ КОНСТРУКЦИИ

В. А. Мейтин, М. П. Толпежников, В. Н. Мокшанов, М. В. Кузнецов, К. Е. Токарев

АО «НПК «СПП»
e-mail: otdel110@npk-spp.ru

Аннотация. Рассматривается возможность повышения точности работы устройства коллинеарного переноса лучей на расстояния до метров при его произвольных расположениях в пространстве на нестабильных основаниях путем учета деформаций конструкции.

При точном контроле размеров, юстировке и монтаже крупногабаритных изделий важное место занимают вопросы обеспечения коллинеарного переноса лучей, визирных осей и исходных направлений на расстояния до нескольких метров. Применяемые для таких целей оптические средства измерений либо неудобны в эксплуатации, либо не обеспечивают необходимой точности. Вместе с тем, для решения таких задач можно пользоваться сравнительно простыми оптическими приборами на основе устройств коллинеарного переноса лучей (УКПЛ). Под УКПЛ понимается зеркально-призменная система с двумя концевыми отражателями, установленными на концах протяженной (например, до нескольких метров) механической базы вместе с оптическими клиньями или без них. По своему оптическому действию УКПЛ эквивалентно триппель-призме или ромб-призме. С применением УКПЛ актуально получение высоких точностей коллинеарного переноса лучей, например, до 0,5–2», на расстояния до нескольких метров при работах в произвольных пространственных положениях на нестабильных до 3–5' основаниях.

Однако существующие УКПЛ на практике не получили большого распространения, так как не обеспечивают высокоточный коллинеарный перенос из-за проблемы обеспечения стабильности взаимных угловых положений концевых отражателей.

Известны технические решения [1, 2] с компенсационными схемами, позволяющие уменьшать влияние деформаций механической базы УКПЛ и таким образом повышать точность до 2–3», но их недостатком является отсутствие информации о том, насколько надежно обеспечивается такая точность. Это особенно важно, когда в процессе работы требуется знать, с погрешностями, например, до долей угловой секунды, нарушения точности коллинеарного переноса лучей и иметь возможность учитывать эти нарушения в виде поправок высокоточного коллинеарного переноса лучей в реальном масштабе времени.

В связи с этим предлагается улучшенная конструкция такого устройства [3], с возможностью измерения изменений в процессе работы (из-за возможных случайных деформаций конструкции УКПЛ) взаимных угловых положений концевых отражателей и их учета в виде поправок в реальном масштабе времени. Такое устройство названо УКПЛ с активным учетом деформаций. Ожидаемая погрешность коллинеарного переноса лучей устройством на расстояния до нескольких метров при эксплуатации в произвольных пространственных положениях и размещении на нестабильных основаниях оценивается на уровне долей угловой секунды.

Литература

1. Пачини Ф., Рихтер В., Вильсон Р. Оптические телескопы будущего. М.: Мир, 1981. 433 с.

2. Авторское свидетельство № 957147. Устройство для коллинеарного переноса оптических осей // Бюллетень изобретений № 33. 1982.
3. Патент РФ на изобретение №2824311 / 07.08.2024 Мейтин В.А., Олейников И.И., Тунгушпаев А.Т., Архипов С.А., Кузнецов М.В., Валиев А.Р., Мокшанов В.Н., Толпежников М.П. Устройство коллинеарного переноса лучей.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО С ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТЬЮ МЕЖДУ ЗЕРКАЛАМИ РЕЗОНАТОРА

Д. А. Коннов, С. В. Варжель, К. А. Коннов, И. Д. Казачкова, В. В. Савин

Университет ИТМО, институт «Высшая инженерно-техническая школа»
e-mail: dakonnov@itmo.ru

Аннотация. В этой работе предлагается конструкция и метод сборки волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо.

Существует ряд работ [1], посвященных разработке интерферометра Фабри-Перо с воздушным резонатором, однако они имеют ряд сложностей, которые связаны с обеспечением высокой видности интерференционной картины. Из ключевых проблем подобных решений можно выделить высокую сложность и степень точности изготовления, а также отсутствие возможности регулировать длину базы интерферометра.

В данной работе в качестве зеркал резонатора используются полированные торцы многомодового градиентного оптического волокна с нанесенными на них методом электронно-лучевого напыления тонкими пленками TiO_2 . Длина участка оптического волокна с градиентом показателя преломления предварительно рассчитывается, после чего производится его соединение со стандартным телекоммуникационным одномодовым оптическим волокном путем электродуговой сварки. На рис. 1 представлена предлагаемая конструкция волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с воздушным резонатором.

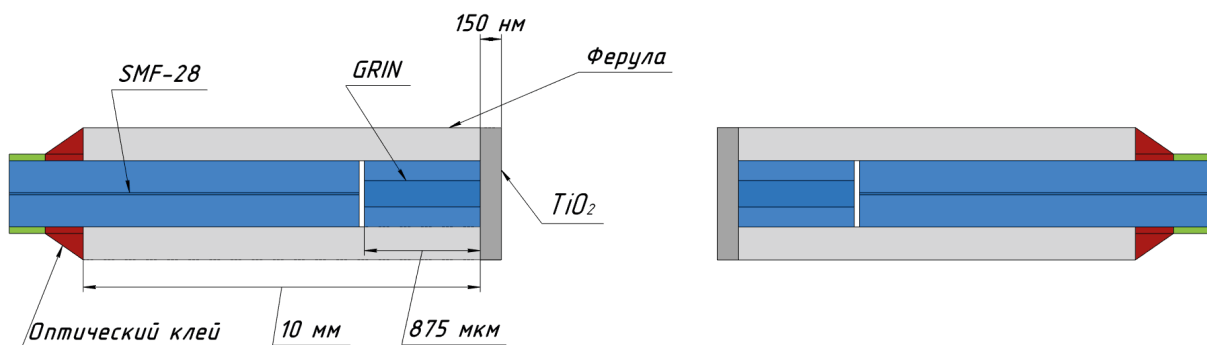


Рис. 1. Конструкция волоконно-оптического интерферометра Фабри-Перо с воздушным резонатором

По результатам работы получены образцы с воздушным резонатором с длиной базы от 0,5 до 5 мм с шагом в 0,5 мм. Видность интерференционной картины составила от 0,989 до 0,679, а свободный спектральный диапазон — от 1,707 до 0,178 нм. Результаты проведения эксперимента по определению показателя преломления иммерсионного масла и высокая видность интерференционной картины доказывают, что предлагаемая конструкция интерферометра может быть использована в качестве датчика показателя преломления жидкостей.

Литература

1. Duan D. W., Rao Y., Hou Y.-S., Zhu T. Microbubble based fiber-optic Fabry-Perot interferometer formed by fusion splicing single-mode fibers for strain measurement // Appl. Optics. 2012. Vol. 51. P. 1033–1036.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО БЕЛОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОСВЕТКИ РАСТЕНИЙ

*Р. А. Куренков, Г. М. Галина, Е. В. Левин, М. М. Дегтерева,
И. А. Ламкин, С. А. Тарасов*

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
e-mail: rkurenkov7@gmail.com

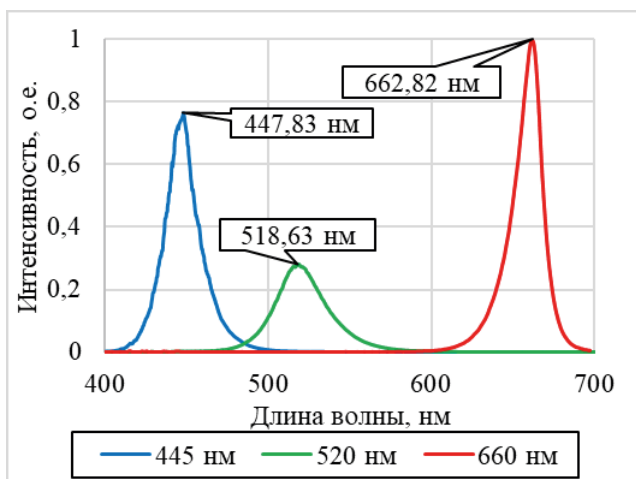
Аннотация. В ходе работы был реализован автоматизированный источник излучения с использованием светодиодов с пиковой длиной волны излучения 447,8 нм, 518,6 нм и 662,8 нм для эффективного выращивания растений с реализацией режима освещения дневного света. Были проведены исследования характеристик светодиодов (вольт-амперная, ватт-амперная, эффективность, спектральная характеристика, плотность фотосинтетического потока фотонов), разработаны электрическая схема устройства и программное обеспечение, осуществлена сборка устройства.

Спектральный состав излучения фитооблучателя является одним из наиболее важных параметров, определяющих эффективность освещения сельскохозяйственных культур, поскольку он должен соответствовать спектрам поглощения фотосинтетических пигментов растений. В связи с тем, что находящиеся в растениях фотопигменты и фоторецепторы поглощают излучение, в агрофотонике выделяют диапазон длин волн видимой области спектра от 400 до 700 нм, который называется фотосинтетически активной радиацией (ФАР) [1]. Ключевое значение для эффективного протекания процесса фотосинтеза имеют диапазоны длин волн 400–450 нм и 600–700 нм, что связано с пиками поглощения хлорофилла *a* и *b* и хромофоров, которые влияют на параметры развития: объем зеленой массы, рост, размер листьев. Комбинация светодиодов с длинами волн 400–450 нм и 600–700 нм формирует оптимальный спектральный состав излучения для роста растений. Однако спектр, оптимальный для роста растений, вызывает дискомфорт для глаз при работе в непосредственной близости от источника излучения. Актуальной задачей является создание автоматизированного источника излучения для эффективного выращивания растений с возможностью создания режима освещения дневного света.

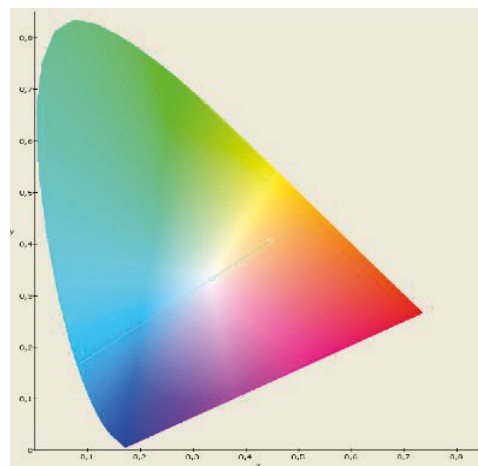
Для подбора количества излучателей были исследованы электрические и оптические характеристики светоизлучающих диодов (СИД). На рис. 1(а) приведены спектральные характеристики СИД с пиковой длиной волны 447,8 нм и 662,8 нм, которые наилучшим образом согласованы со спектрами поглощения хлорофилла *a* и *b*, а также СИД 518,6 нм для реализации режима освещения дневного света. Важным параметром для реализации качественного освещения растений является плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD). Согласно ранее проведенным исследованиям, уровень PPFD создаваемого источника для эффективного выращивания растений должен быть не менее $300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [2].

При помощи программного обеспечения SpectraSuite были проведены измерения коррелированной цветовой температуры и индекса цветопередачи фитооблучателя, представляющего собой комбинацию светодиодов с пиковой длиной волны 447,8 нм, 518,6 нм и 662,8 нм. На рис. 1(б) представлена XY-диаграмма МКО 1931 с обозначением цветовых координат светоизлучающего устройства с полученной коррелированной цветовой температурой 5350 К и параметром CRI Ra 90,6.

Оптимальными для разработанного источника были выбраны следующие параметры: $\text{PPFD} = 300 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, расстояние от источника излучения до облучаемой поверхности — 30 см, рабочий ток на светодиодах — 300 мА.



(a)



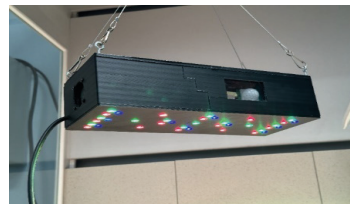
(б)

Рис. 1. Экспериментальные характеристики: а) спектральная характеристика трех СИД при протекающем токе 300 мА; б) XY-диаграмма МКО 1931

Экспериментально рассчитано необходимое количество излучателей каждого вида для обеспечения оптимальных параметров излучения: 10 СИД 447,8 нм, 14 СИД 662,8 нм и 13 СИД 518,6 нм. Автоматизированное управление излучением производится с помощью микроконтроллера с разработанным программным обеспечением в среде С++ с использованием датчиков движения. Разработанный автоматизированный источник излучения в режиме подсветки растений представлен на рис. 2(а), в режиме освещения дневного света — на рис. 2(б).



(a)



(б)

Рис. 2. Разработанный источник излучения: а) режим освещения для эффективного роста растений; б) режим «белого» освещения

Литература

1. ГОСТ Р 58461-2019. Освещение растений в сооружениях закрытого грунта. М.: Стандартинформ, 2019.
2. Levin Ye., Romanovich M. M., Degterev A. E., Lamkin I. A. Creation of an Automated Cultivation System Containing Phyto-Illumination of the UV and Visible Ranges of the Spectrum // Seminar on Fields, Waves, Photonics and Electro-optics: Theory and Practical Applications (FWPE). Saint-Petersburg, 2023. P. 114–116.

ОБЪЕМНЫЕ ФАЗОВЫЕ МАСКИ ИЗ СТЕКЛА ФТР: ВИХРЕВОЙ ПУЧОК

А. Ахмад, Н. В. Никоноров

Университет ИТМО
e-mail: be.serious123@hotmail.com

Аннотация. В работе рассматриваются исследования методов генерации и детекции вихревых пучков, что помогает лучше понять и использовать эти уникальные оптические явления. Проанализированы характеристики вихревых пучков, рассмотрены области их применения.

Вихревые пучки представляют собой специализированные световые пучки, характеризующиеся спиральной фазовой структурой, что придает им уникальные оптические свойства и применения. Эти пучки описываются фазовым множителем вида $\exp(i l \theta)$, где l обозначает топологический заряд (ТС), а θ представляет собой азимутальный угол. ТС указывает количество витков волнового фронта вокруг оптической оси, причем для традиционных вихревых пучков характерны целочисленные значения. Эта спиральная фаза приводит к профилю интенсивности в форме «бублика» с центральной темной областью, называемой фазовой сингулярностью, что играет ключевую роль в различных приложениях в области оптики и квантовой механики.

Орбитальный угловой момент (ОАМ). Одной из значимых характеристик вихревых пучков является их способность переносить орбитальный угловой момент (ОАМ), который измеряется как $l\hbar$ на фотон, где $\hbar$ — приведенная постоянная Планка. Эта характеристика связывает макроскопические оптические явления с квантовыми эффектами, показывая, что каждый фотон может обладать различными значениями ОАМ, которые определяются топологическим зарядом [1]. ОАМ демонстрирует высокую устойчивость, что делает его ценным ресурсом в таких областях, как оптическая связь, где использование нескольких ортогональных состояний ОАМ увеличивает емкость передачи информации [2].

Применение вихревых пучков. Вихревые пучки благодаря своим уникальным свойствам находят применение в различных областях:

- оптическая связь: использование различных состояний ОАМ позволяет передавать данные с высокой пропускной способностью;
- манипуляция частицами: вихревые пучки могут оказывать крутящий момент на частицы, что позволяет точно управлять ими в задачах микроманипуляции;
- оптическая визуализация: вихревые пучки улучшают разрешение изображения и возможности обнаружения краев по сравнению с традиционными методами визуализации;
- квантовая информация: вихревые пучки способствуют квантовой запутанности и манипуляции квантовыми состояниями высокой размерности [1, 2].

Дробные вихревые пучки. Недавние исследования привели к созданию дробных вихревых пучков, у которых ТС принимает нецелые значения. В отличие от целочисленных вихревых пучков, такие пучки имеют разрывы в фазовой структуре и уникальные распределения интенсивности, что открывает возможности для передовых приложений, таких как сортировка клеток и улучшенная визуализация. Дробные вихревые пучки могут быть представлены как суперпозиция целочисленных вихревых состояний, что позволяет проводить сложные манипуляции со светом [3]. Способность

сопротивляться шуму и обеспечивать высокое разрешение делает их перспективными для будущих оптических технологий [1].

Закключение. Исследование вихревых пучков, особенно их дробных вариантов, открыло новые направления как в фундаментальных исследованиях, так и в практических приложениях. Постоянное совершенствование методов генерации и детекции помогает лучше понять и использовать эти уникальные оптические явления. Дальнейшие исследования, вероятно, выявят еще более сложные свойства и применения вихревых пучков, подтверждая их значимость для научных дисциплин.

Литература

1. Shen Y., Wang X., Xie Z. et al. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light Sci Appl.* 2019. No. 8. P.90.
2. Yihua B., Haoran L., Xin F., Yuanjie Y. Vortex beam: generation and detection of orbital angular momentum [Invited] // *Chin. Opt. Lett.* 2022. No. 20. P.012601.
3. Wei B.-Y., Hu W., Ming Y., Xu F., Rubin S., Wang J.-G., Chigrinov V.G., Lu Y.-Q. Generating Switchable and Reconfigurable Optical Vortices via Photopatterning of Liquid Crystals // *Advanced Materials.* 2014. No. 26. P.1590–1595.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ МОРСКИХ И ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПО НАВИГАЦИОННЫМ ОГНЯМ С ПОМОЩЬЮ ОЭС НА БПЛА

В. А. Тупиков, В. М. Самков, Б. С. Бутин

АО «НПП «АМЭ»
e-mail: tupikov@nppame.ru

Аннотация. В работе рассматриваются методы автоматического определения ориентации морских и воздушных судов по навигационным огням с помощью оптико-электронной системы, установленной на беспилотном летательном аппарате.

Автоматическое определение ориентации морских и воздушных судов по навигационным огням с помощью оптико-электронной системы (ОЭС), установленной на беспилотном летательном аппарате (БПЛА), позволяет оперативно на большой площади и большом расстоянии автоматически определить направление его движения, техническое состояние, а также тип судна.

Выполнение данной задачи реализовано на базе теории распознавания образов с помощью ОЭС, установленной на борту БПЛА, и может быть реализовано при решении задач специальной обработки оптических изображений с учетом наблюдаемой комбинации цветовых огней в условиях слабой освещенности и плохой видимости.

Данный метод применим при наблюдении судов в разных навигационных условиях плавания: в открытом море, включая территориальные воды, за исключением районов действия особых местных правил; в узкости; в системе разделения движения; на судах с механическим двигателем; судах, лишенных возможности управляться или ограниченных в возможности маневрировать; судах, занятых буксировкой и толканием; парусных судах на ходу и судах на веслах; рыболовных судах; судах, стесненных своей осадкой; лоцманских судах; судах на якорю и судах на мели; гидросамолетах и экранопланах — при любых условиях видимости.

При наблюдении сигнальных огней воздушных судов можно определить направление полета и ориентацию в пространстве.

В основной состав ОЭС входят цветной телевизионный канал, блок обработки изображения с реализованными в нем специальными алгоритмами обработки и базой данных о комбинациях навигационных огней.

Пример расположения цветовых огней на надводном корабле представлен на рис. 1.

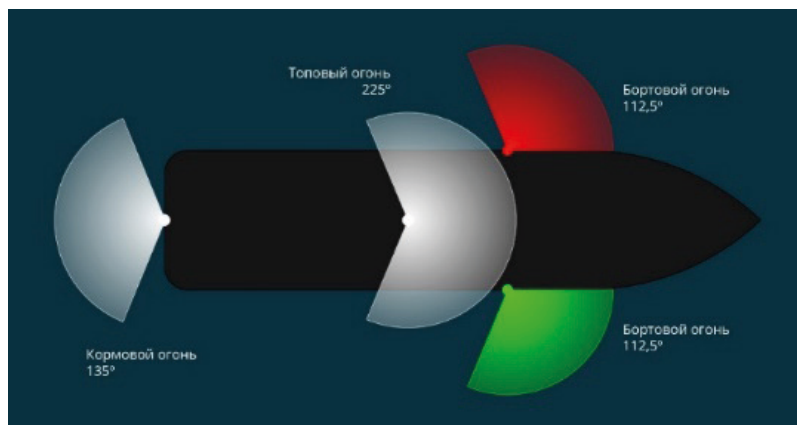


Рис. 1. Расположение цветовых огней на надводном корабле

Различные комбинации навигационных огней для надводных кораблей описаны в МППСС-72 [1].

Для всех воздушных судов также предусмотрены бортовые аэронавигационные и габаритные огни.

Литература

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море. М.: УНиО МО РФ, 2010.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СВОЙСТВ ОПТИЧЕСКИХ ИНФРАКРАСНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

А. Н. Тропин

АО «НИИ "Гириконд"»

e-mail: 216@giricond.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки и исследования блокирующих и узкополосных инфракрасных интерференционных фильтров для спектрального диапазона от 5 до 15 мкм. Приведены температурные зависимости спектральных характеристик разработанных фильтров в диапазоне температур от 300 К до 80 К.

При разработке и создании охлаждаемых инфракрасных приемников оптического излучения для современных приложений необходимы инфракрасные интерференционные фильтры, работающие при криогенных температурах. На свойства интерференционных фильтров, прежде всего на их спектры пропускания, влияет температура, при которой работают фильтры [1].

На рис. 1 приведена структура (зависимость показателя преломления от толщины покрытия) одного из разработанных и исследованных узкополосных фильтров на подложке из германия. На рис. 2 представлены его спектральные характеристики, измеренные при температурах 300 К и 80 К.

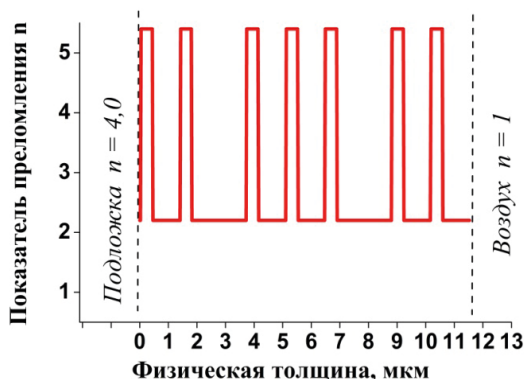


Рис. 1. Структура узкополосного фильтра с $\lambda_{\max} = 8,95$ мкм

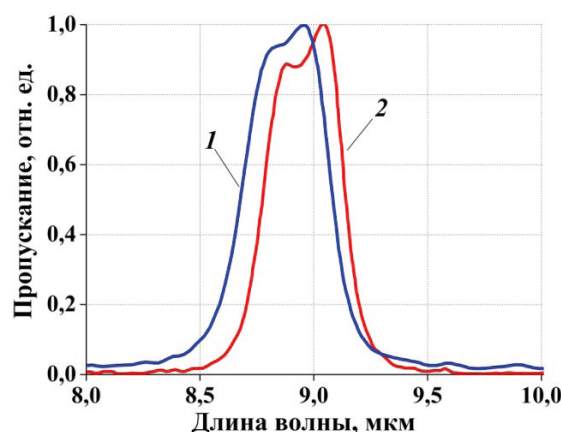


Рис. 2. Спектры пропускания фильтра при $T = 300$ К (1) и $T = 80$ К (2)

Спектральные измерения фильтров при различных температурах проводились на Фурье-спектрометре ФСМ-1201 с применением заливного азотного криостата модели LN-120.

Экспериментально продемонстрирован сдвиг спектральных характеристик пропускания для блокирующих и узкополосных фильтров при охлаждении до 80 К. При этом, например, для узкополосных фильтров смещение $\lambda_{\max}$ может происходить как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения длины волны и зависит от структуры многослойного покрытия и применяемых пленкообразующих материалов.

Литература

1. Hawkins G., Sherwood R., Djotni K., Coppo P., Höhnemann H., Belli F. Cooled infrared filters and dichroics for the sea and land surface temperature radiometer // Applied Optics. 2013. No. 52(10). P.2125–2135.

Секция 5

МЕТРОЛОГИЯ И СТЕНДЫ

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЕЛИЧИНЫ ХОРДЫ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Л. С. Родикова, В. В. Коротаев, А. Н. Тимофеев

Университет ИТМО
e-mail: ls_rodikova@itmo.ru

Аннотация. В этой работе представлена оценка степени влияния и путей ослабления составляющих погрешности контроля величины хорды рабочей лопатки в оптико-электронной системе на закрытом цилиндре при валоповороте.

В цилиндрах низкого давления (ЦНД) паровых турбин рабочие лопатки ротора (РЛ) подвергаются сильному эрозионному износу, что ведет к сокращению ресурса и эффективности их работы. Для предотвращения этих эксплуатационных явлений проводятся плановые осмотры лопаточного аппарата с помощью средств видеоэндоскопии, позволяющих на закрытом цилиндре оценивать и принимать решения о степени износа [1, 2].

Существующие видеоэндоскопы обеспечивают точность бесконтактного контроля параметров формы РЛ при статическом положении ротора [3, 4], но не могут использоваться непосредственно для контроля в режиме валоповорота, поскольку не снабжены модулями синхронизации положения РЛ при контроле на скоростях перемещения до 0,35 м/с и программными средствами выработки решения о степени их износа или повреждения [5].

Анализ степени влияния составляющих погрешности определения величины хорды РЛ показал, что суммарная погрешность δb_i^{Σ} при фиксированном фокусе слабо зависит от дистанции до РЛ, а наибольший вклад, по степени убывания, вносят погрешности задания фокусного расстояния объектива видеоозонда δ_i^f и погрешность от воздействия изменений температуры окружающей среды $\delta b_i^{\Delta T}$ (рис. 1).

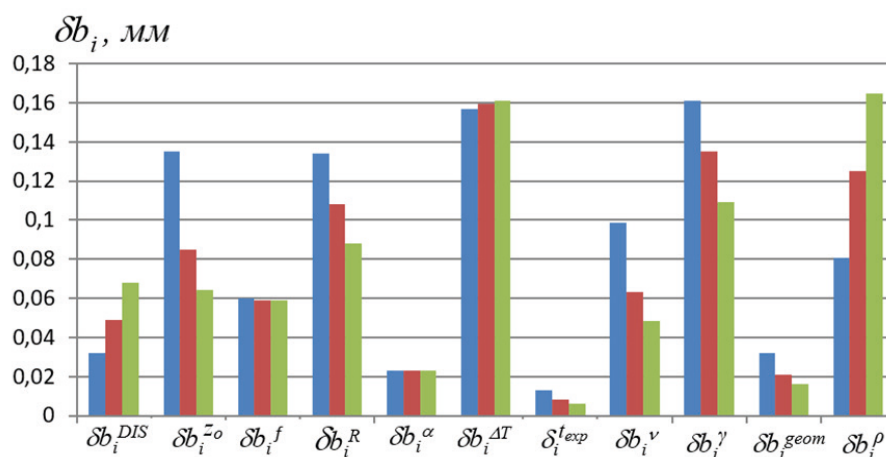


Рис. 1. Диаграммы степени влияния составляющих на суммарную погрешность на расстояниях до РЛ, равных 70 мм, 115 мм, 150 мм

Анализ показал, что суммарная погрешность на рабочих дистанциях до РЛ, равных 100–115 мм, может превышать 0,55 мм, что не удовлетворяет требуемой величине задаваемой погрешности. Однако юстировка системы и ее калибровка позволяют компенсировать погрешности изготовления и сборки и уменьшить величину суммарной погрешности. Очевидно, что влияние таких факторов, как температура окружающей среды и коэффициент отражения поверхности РЛ, скомпенсированы введением дополнительных каналов и программных модулей.

Из диаграмм также видно, что, с учетом юстировки и калибровки, с использованием специального крепления и адаптивной подсветки суммарная величина погрешности контроля РЛ на рабочих дистанциях до РЛ, равных 115 мм, уменьшилась до 0,29 мм, что удовлетворяет требуемой величине задаваемой погрешности для технологического отверстия турбины с погрешностью менее 0,5 мм.

Литература

1. Хаимов В. А., Кокин Е. Ш., Пузырев Е. И. Внедрение системы оперативного контроля и диагностики эрозионного износа рабочих лопаток мощных паровых турбин // Энергетические станции. 2006. № 12. С. 32–36.
2. Шуть Г. А., Коротаев В. В., Пузырев Е. И., Рыжова В. А., Тимофеев А. Н., Ахмеров А. Х., Родикова Л. С. Видеоэндоскопирование рабочих лопаток паровых турбин и контроль их геометрических параметров // Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 11. С. 58–67.
3. Малорасходные режимы ЦНД турбины Т-250/300-240 / под ред. В. А. Хаимова. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 240 с.
4. Шуть Г. А., Пузырев Е. И., Васильева А. В., Васильев А. С., Некрылов И. С., Ахмеров А. Х., Тимофеев А. Н. Комплексная система эндоскопирования для контроля эрозионного износа лопаток паровых турбин // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 3. С. 228–237.
5. Maraev A. A., Shut G. A., Timofeev A. N., Mikheev S. V., Akhmerov A. Kh., Rodikova L. S., Kon'yakhin I. A. Effect of illumination on errors in estimation of a rotor blade chord value during intelligent video endoscopy of a closed steam turbine cylinder // Studies in Systems, Decision and Control. 13 April 2022.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ УСТАНОВОК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

М. Б. Леонов

Филиал АО «Корпорация “Комета”» —
«Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения»
e-mail: muxeu87@yandex.ru

Аннотация. Предложена классификация погрешностей установок, которая может быть использована для определения погрешности измерений функции передачи модуляции, полученной путем преобразования Фурье функции рассеяния линии.

В современных компьютеризированных установках для измерения функции передачи модуляции (ФПМ), наиболее полно характеризующей качество объективов для оптико-электронных систем, реализуется метод сканирования функции рассеяния линии (ФРЛ) или точки с последующим преобразованием Фурье для получения ФПМ. Практические вопросы определения погрешности установок для измерения ФПМ были рассмотрены в стандарте [1], теоретические, преимущественно для метода гармонического анализа, — в работе [2], для метода сканирования — в международном стандарте [3]. В связи с тем, что метод гармонического анализа уже не используется, а стандарт [3] давно не обновлялся, предлагается следующая классификация погрешностей установок с учетом современного уровня их развития.

Систематические погрешности измерений ФПМ можно разделить на две группы: первая — погрешности, вызванные определением поправочных коэффициентов, вторая — погрешности измерений ФРЛ.

К поправочным коэффициентам относятся коэффициенты, учитывающие конечные размеры измерительной диафрагмы и изображения предметной диафрагмы, коэффициент, учитывающий нелинейность световой характеристики приемника излучения.

К погрешностям измерений ФРЛ относятся погрешности изготовления коллиматорного и проекционного объективов, погрешность определения шага и диапазона сканирования, погрешность определения актиничного потока, влияние когерентности источника излучения, непрямолинейность направляющих поперечного транслятора.

Случайные погрешности связаны с шумами приемников излучения, нестабильностью напряжения питания источников и приемников излучения, погрешностью определения максимума ФРЛ, вибрацией.

По результатам рассмотрения погрешностей установок для измерения ФПМ выработаны требования к узлам установок, обеспечивающие неисключенную систематическую составляющую погрешности измерений ФПМ на уровне 0,02 отн. ед., случайную — 0,01 отн. ед., как при механическом сканировании ФРЛ, так и при «электронном», с использованием многоэлементных фотоприемных устройств.

Литература

1. ОСТ 3-2635-82. Устройства для измерения функции передачи модуляции съёмочных объективов. Метод поверки.
2. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. Л.: Машиностроение, 1990. 224 с.
3. ISO 11421:1997. Optics and optical instruments — Accuracy of optical transfer function (OTF) measurement.

ВЛИЯНИЕ ДИСТОРСИИ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ФУНКЦИИ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ

М. Б. Леонов, Е. С. Терлецкий, Д. А. Серегин

Филиал АО «Корпорация “Комета”» —
«Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения»
e-mail: muxeu87@yandex.ru

Аннотация. Представлена формула для учета влияния дисторсии при измерении функции передачи модуляции широкоугольных объективов. На примере объектива LWIR диапазона показано возможное увеличение погрешности измерений функции передачи модуляции.

Одной из главных характеристик широкоугольных объективов является дисторсия, которая может принимать достаточно высокие значения. С учетом стандарта [1], формула для определения относительной дисторсии V_r объективов, работающих из бесконечности, может быть представлена в виде:

$$V_r = [(f'_\omega - f'_0) / f'_0] \cdot 100\%, \quad (1)$$

где f'_0 — параксиальное фокусное расстояние, мм; f'_ω — фокусное расстояние, измеренное для углового поля ω в пространстве предметов, мм.

Именно по формуле (1) реализовано измерение относительной дисторсии в коллиматорных установках типа ImageMaster (TRIOPTICS, GmbH, Германия).

При измерениях ФПМ, согласно стандарту [2], выполняется расчет поправочного коэффициента на ширину изображения коллиматорной диафрагмы, но для широкоугольных объективов необходимо учитывать реально измеренное фокусное расстояние для углового поля ω . Таким образом, при известной ширине коллиматорной диафрагмы b_k ширина ее геометрического изображения b'_k в меридиональном сечении в проекции на плоскость сканирования составит:

$$b'_k = (f'_\omega / f'_k) \cdot (b_k / \cos(\omega)), \quad (2)$$

где f'_k — фокусное расстояние коллиматорного объектива, мм.

Наиболее существенно влияние дисторсии проявляется при контроле объективов LWIR диапазона, где используются измерительные диафрагмы шириной $\sim 0,01$ мм и требуется соответствующий размер геометрического изображения коллиматорной диафрагмы. Например, для объектива с фокусным расстоянием $f' = 11$ мм, угловым полем $2\omega = 73,6^\circ$ и относительной дисторсией 17 % [3] геометрический размер изображения коллиматорной диафрагмы по полю может измениться на 0,004 мм по сравнению с центром, что приведет к увеличению погрешности измерений ФПМ на 0,09 отн. ед. Представленная формула (2) позволит проводить достоверные измерения ФПМ широкоугольных объективов по полю и может применяться независимо от спектрального диапазона испытуемого объектива.

Литература

1. ISO 9039:2008. Optics and photonics — Quality evaluation of optical systems — Determination of distortion.
2. ГОСТ Р 58566-2019. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний.
3. Широугольный атермальный объектив OptoTL 11 f/1,0 LWIR AT (оптический расчет и конструкция) // ООО «Опто-технологическая лаборатория» [Электронный ресурс]. URL: https://optotl.ru/optical_assemblies/lwir-obektiv/optotl-11-f-1-0-lwir-at/ (дата обращения: 23.07.2024).

АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ АСТИГМАТИЗМА ЛИНЗ В ОПРАВАХ ПО РАСФОКУСИРОВОЧНЫМ КРИВЫМ

М. Б. Леонов, Д. В. Мякинин, Д. А. Серегин, Н. Ю. Грибова

Филиал АО «Корпорация “Комета”» —
«Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения»
e-mail: muxeu87@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается автоколлимационный метод контроля астигматизма линз в оправе по расфокусирующим кривым коэффициента передачи модуляции. Успешно проведена апробация метода с использованием макета на основе автоколлимационного прибора СТ-41 и ПЗС-камеры, выполнено сравнение разработанного метода с интерферометрическим.

Астигматизм линз в оправе в волновой мере традиционно контролируется интерферометрическим методом в процессе закрепления линз в оправе тем или иным способом. Существуют стандартизированные методы [1, 2], регламентирующие контроль астигматизма объективов в линейной мере как разность между плоскостями наилучшего изображения в двух взаимно перпендикулярных сечениях. Если в [1] для определения астигматической разницы выполняют визуальную фокусировку на изображение в двух взаимно перпендикулярных сечениях, то в соответствии с [2] измеряют расфокусирующие кривые коэффициента передачи модуляции (КПМ).

Предлагаемый метод измерения астигматизма линз в оправе отличается от [2] тем, что измерение расфокусирующих кривых КПМ в двух взаимно перпендикулярных сечениях происходит не в плоскости изображения испытуемого объектива, а в автоколлимационных точках поверхностей линзы.

Для апробации предложенного метода был разработан макет на основе автоколлимационного прибора СТ-41 и ПЗС-камеры. Выполнено сравнение с интерферометрическим методом: подтверждено наличие астигматизма в серии испытуемых линз, результаты контроля одной из которых представлены на рис. 1.

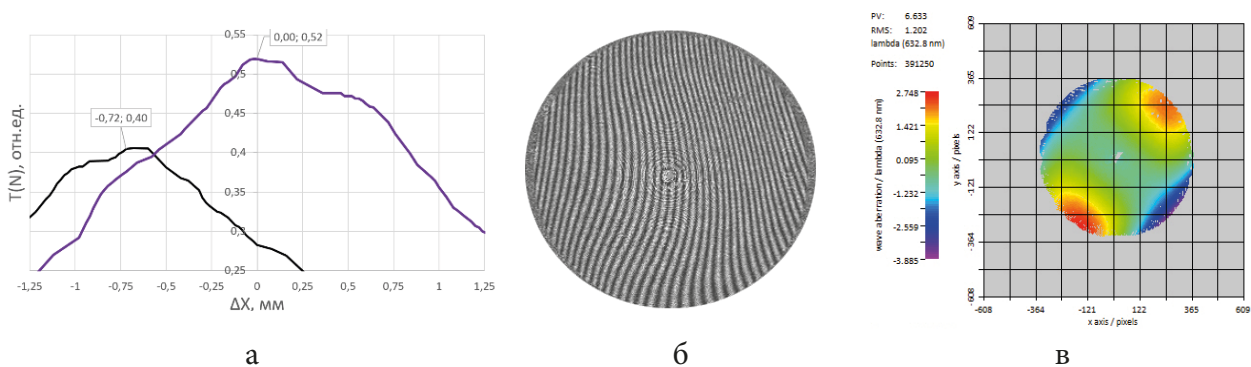


Рис. 1. Результаты апробации метода контроля астигматизма:

а — расфокусирующие кривые КПМ; б — интерферограмма; в — волновой фронт

Полученные результаты в перспективе позволят проводить оперативный контроль пережата линз в оправе непосредственно при сборке, что сократит время сборки объективов в целом.

Литература

1. ГОСТ 23699-79. Объективы съёмочные. Метод измерения кривизны изображения и астигматизма.
2. ГОСТ Р 58566-2019. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний.

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ НАБЛЮДЕНИЯ

*В. В. Коротаев¹, Г. Н. Маркушин², М. А. Чехов²,
М. М. Симановский², В. А. Рыжова¹*

¹ Университет ИТМО

² ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»

e-mail: korotaev_v_v@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрен стенд для исследования погрешности систем стабилизации линии визирования оптико-электронных систем наблюдения.

Вибрации носителей оптико-электронных систем наблюдения (ОЭСН), например, вертолета или беспилотного летательного аппарата, приводят к размытию изображения, что снижает вероятность обнаружения, распознавания, идентификации объектов [1, 2]. Кроме воздействия вибраций, ОЭСН испытывают также воздействие низкочастотных угловых колебаний, например, качки.

Разработан стенд для формирования синусоидальных колебаний в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц, воздействующих на платформу системы стабилизации, и исследования влияния таких колебаний на системы стабилизации линии визирования ОЭСН [3].

Разработана методика экспериментальной оценки погрешности стабилизации линии визирования и проведены экспериментальные исследования ОЭСН с двухосевой системой стабилизации платформы с визирными каналами с двойным карданным подвесом с угломестным и азимутальным приводами подслеживания [4].

Исследования ОЭСН на разработанном стенде показали, что при задаваемых угловых колебаниях в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц и соответствующих величинах задаваемых амплитуд оценка СКО погрешности стабилизации линии визирования не превышает 12 угл. с. Рост СКО погрешности наблюдается при увеличении частоты колебаний в диапазоне от 0,3 до 1 Гц при неизменной амплитуде колебаний и при соответствующем росте энергии задаваемых колебаний.

Исследование влияния широкополосной вибрации в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц на нестабильность линии визирования показало, что СКО линии визирования не превышает 15 угл. с, а на резонансной частоте 40 Гц достигает 22 угл. с.

Стенд и методика позволяют выявить резонансные частоты ОЭСН и использовать получаемые результаты при их настройке.

Литература

1. Буслов И. А., Гордеев А. Е., Доррер Г. А., Кобыжакова С. В., Яровой С. В. Система управления борьбой с природными пожарами на базе беспилотных летательных аппаратов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2–3. С. 858–863.
2. Маркушин Г. Н., Коротаев В. В., Кошелев А. В., Самохина И. А., Васильев А. С., Тимофеев А. Н., Васильева А. В., Ярышев С. Н. Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-09-36-48
3. Патент № 2823550 Российская Федерация. С1. Стенд синусоидальных колебаний: опубл. 24.07.2024. Бюл. № 21 / Симановский М. М., Чиванов А. Н., Дедков А. А., Маркушин Г. Н.,

Кошелев А. В. Правообладатель — АО «ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»».

4. Патент № 2388662 Российская Федерация. Система оптического наблюдения: опубл. 10.05.2010 / Максим С. В., Рассохин В. А, Элинсон В. С., Уманский Б. М., Гилев Ю. В., Дегтярев Н. Г. Правообладатель — АО «ПО «Уральский оптико-механический завод им. Э. С. Яламова»».

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВАЛИДАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОВ КОЛОРИМЕТРИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Е. Н. Савкова

Белорусский национальный технический университет
e-mail: savkova@bntu.by

Аннотация. В данной работе представлена методология исследований валидационных характеристик методов колориметрии цифровых изображений — селективности, предела обнаружения, предела количественного определения, правильности, прецизионности, неопределенности, линейности, чувствительности, робастности и диапазона применения как комплексных показателей, включающих пространственный, временной, яркостный, хроматический и информационный компоненты.

Сличительные эксперименты, проведенные на базе аккредитованных светотехнических лабораторий Республики Беларусь, позволили выявить зависимости и закономерности координат цвета и цветности от внутренних и внешних факторов и установить, что представление цветового пространства XYZ как однополосного гиперболоида (в развитие концепции [1]) с разложением на семейства векторов $X^k_j Y^k_j Z^k_j$ вдоль ахроматической оси $X^k_0 Y^k_0 Z^k_0$, как показано на рис. 1, позволяет дать графическую интерпретацию валидационных характеристик методов колориметрии цифровых изображений.

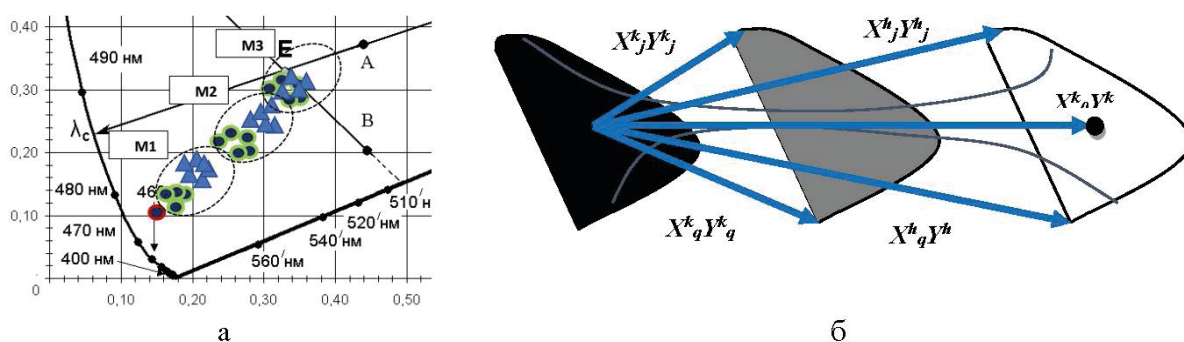


Рис. 1. Графическая интерпретация цветового пространства XYZ:
а — фрагмент графика цветностей; б — тензорная модель

Для математического описания валидационных характеристик предлагается использовать формулу проекции структурного цветового тензора $\mathbf{G}$ на плоскость графика цветностей (в данном случае — цветового пространства XYZ), формула (1):

$$G^\Psi = \frac{\sum_{j=1}^m \left((X^\Psi)^2 + (Y^\Psi)^2 + (Z^\Psi)^2 \right) \frac{\prod_{j=1}^m X_j^\Psi + \prod_{j=1}^m Y_j^\Psi + \prod_{j=1}^m Z_j^\Psi}{\prod_{j=1}^m X_j^\Psi + \prod_{j=1}^m Y_j^\Psi + \prod_{j=1}^m Z_j^\Psi}}{\sum_{j=1}^m \left((X^\Psi)^2 + (Y^\Psi)^2 + (Z^\Psi)^2 \right)}, \quad (1)$$

где Ψ — номер сектора цветового пространства; j — номер реализации (цифрового изображения) опорного образца, формирующего условную виртуальную шкалу.

Точность определения цвета задается смещением центра тяжести объема цветового пространства или площади фигуры на графике цветностей, занимаемым векторным

полем в окрестности точечной оценки величины, от опорного значения, а также рассеянием — геометрическим местом точек в цветовом пространстве или на плоскости.

Литература

1. *Ложкин Л.Д.* Анализ и разработка систем объективной колориметрии в цветном телевидении: дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук: 05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения». Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики. Самара, 2009. 175 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ФИЛЬТРАЦИИ ШУМА ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО ОТ АВТОКОЛЛИМАЦИОННОГО ЭЛЕМЕНТА С ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГРАНЬЮ

М. М. Никитин, И. А. Коняхин

Университет ИТМО
e-mail: mmnikitin@itmo.ru

Аннотация. В работе рассматриваются различные алгоритмы фильтрации шума на изображении, формируемом на матричном приемнике, получаемом от автоколлимационной системы, контрольный элемент которой выполнен в форме тетраэдра, имеющего цилиндрическую грань.

Тетраэдрические контрольные элементы (КЭ) находят применение в автоколлимационных системах для двух- или трехкоординатных измерений. Одним из КЭ, позволяющих производить трехкоординатные измерения, является тетраэдрический отражатель с цилиндрической гранью. При этом, в отличие от других типов отражателей, например, аналогичного тетраэдрического элемента с плоскими гранями, имеющими угол, отличный от 90° [1], плоского зеркала или призмной пирамиды, изображение, получаемое на матрице, представляет собой перекрестие, образованное двумя дугами эллипса [2, 3] (рис. 1).

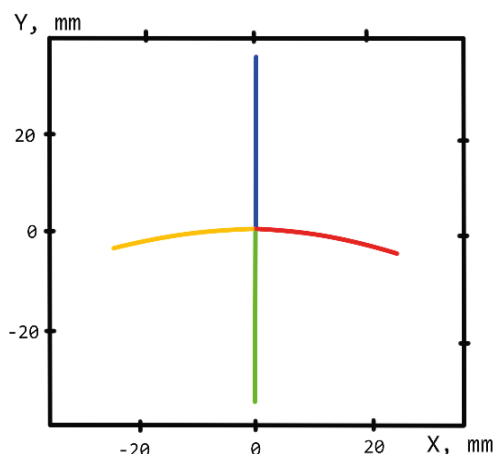


Рис. 1. Вид изображения, получаемого от КЭ в виде тетраэдра, имеющего цилиндрическую грань

Отличительной особенностью такого отражателя является то, что информация об углах поворота КЭ заключена в углах поворота линий на изображении. Следовательно, необходимо уделить особое внимание фильтрации шума, так как данный фактор будет оказывать непосредственное влияние на результат работы алгоритма определения угла поворота линии на изображении.

В качестве тестируемого изображения, согласно математической модели отражателя, было сгенерировано изображение, имеющее размер 700×700 пикселей, ширину линий на изображении, равной 20 пикселям, угол поворота рефлектора — 25° . Для измерения угла поворота линий на изображении было принято решение аппроксимировать их прямыми в связи с малой кривизной данных линий и использовать алгоритм двойного барицентрирования для определения угла поворота.

В работе рассмотрены: фильтр Гаусса, медианный фильтр, non-local means denoising (OpenCV), фильтр Винера, билатеральный фильтр, бинаризация и эрозия.

Литература

1. *Коняхин И.А., Панков Э.Д.* Трехкоординатный автоколлиматор повышенной точности // ОМП. 1982. № 8. С. 41.
2. *Никитин М.М.* Проектирование оптико-электронной системы измерения координат точек объекта методом пространственного раstra / М.М.Никитин // Аннотированный сборник научно-исследовательских выпускных квалификационных работ среди бакалавров и специалистов Университета ИТМО. СПб, 2019. С. 217–223.
3. *Nikitin M., Konyakhin I., Renpu L., Xiao H.* Angular determination algorithm for three-dimensional autocollimation measurements // Proceedings of SPIE. 2023. Vol. 12769. P. 1276913.

ИМИТАТОРЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И ФОНА

Е. В. Яковлев^{1, 2}, В. И. Курт¹, А. В. Соловьев¹, А. В. Синюткин¹

¹ АО «НПО ГИПО», г. Казань

² КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева

e-mail: gipo@shvabe.com

Аннотация. Доклад посвящен имитаторам астрономических источников излучения и фона.

Метод определения местоположения в пространстве по астрономическим источникам излучения (АИИ), известный с древности, актуален и в настоящее время для ориентации и управления полетом спутников, решающих различные задачи, такие как исследование поверхности Земли или обеспечение работы средств связи [1].

Для обеспечения ориентации спутников на орбите и управления полетом по заданному маршруту в их состав входят оптико-электронные системы (ОЭС) астронавигации, которые определяют угловое положение носителя относительно АИИ, выбранных в качестве ориентиров, и навигационных звезд на фоне излучения астрономических источников фонового излучения (АИФИ), к которым могут относиться Луна, Земля, а также Солнце и другие звезды.

Важным этапом при создании ОЭС астронавигации является наземная отработка, при которой воссоздаются условия эксплуатации с использованием специальных имитаторов, воспроизводящих излучение АИИ и фона. Для оценки соответствия характеристик ОЭС астронавигации использовались имитаторы, создающие освещенность АИИ в диапазоне от $1,1 \cdot 10^{-8}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ лк, а также яркость фона в диапазоне от $1 \cdot 10^{-3}$ до 50 кд/м² [1, 2].

Следует отметить, что данные имитаторы созданы в 70-80-е годы XX века, источники излучения, используемые в них, сняты с производства, а замена на современные влечет доработку оптической схемы осветителя. Также уровень яркости фона в 50 кд/м² недостаточен для обеспечения наземной отработки ОЭС астронавигации. Для обеспечения наземной отработки ОЭС астронавигации в АО «НПО ГИПО» разработаны и изготовлены имитаторы звезды и фона, работающие в спектральном диапазоне от 0,4 до 1,0 мкм. Экспериментально определены их технические характеристики:

- Имитатор звезды:
 - а) угловой размер имитируемой звезды не более 30»;
 - б) воспроизводимая освещенность от $6,98 \cdot 10^{-8}$ до $2,78 \cdot 10^{-6}$ лк;
 - в) погрешность воспроизведения освещенности не более 15 %.
- Имитатор фона:
 - а) угловой размер имитируемого фона не более 3°;
 - б) диапазон воспроизводимой яркости фона от 5 до 3000 кд/м²;
 - в) погрешность воспроизведения яркости фона не более 15 %.

Верхний уровень освещенности, создаваемой имитатором звезды, сокращен по сравнению с имитаторами [1, 2], при этом данный имитатор может быть использован для наземной отработки ОЭС астронавигации, чувствительных к низкоуровневому излучению АИИ. У имитатора фона увеличен верхний уровень яркости фона по сравнению с имитаторами [1, 2], что расширяет возможность его применения при наземной отработке ОЭС астронавигации.

Совместное использование имитаторов звезды и фона позволяет наиболее достоверно воспроизвести условия эксплуатации ОЭС астронавигации.

Литература

1. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 248 с.
2. Сjunдиков М. А., Смолин Б. В., Кузovая В. Л. Справочник по имитаторам излучения, выпускаемым предприятиями отрасли. Л. 1970. 81 с.

УСТРОЙСТВА ИМИТАЦИИ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ МИКРОЗЕРКАЛЬНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Д. Ю. Васильев, В. И. Курт, Д. А. Егошин

АО «НПО ГИПО», г. Казань
e-mail: gipo@shvabe.com

Аннотация. Доклад посвящен стендам имитационного моделирования на основе микрозеркальных матриц.

Оптическое излучение позволяет получать большой объем информации о наблюдаемых объектах — их геометрические размеры и форму, энергетическое состояние, скорость и траекторию движения. Возможность принимать и обрабатывать в реальном времени эту информацию делает оптико-электронную аппаратуру (ОЭА) наиболее востребованной среди аппаратуры, осуществляющей обнаружение и распознавание объектов среди окружающего их фона [1]. В современной практике разработки ОЭА остро стоят вопросы испытаний создаваемых образцов в условиях, приближенных к условиям эксплуатации, при нестабильности параметров объектов и окружающего их фона, а также отработки алгоритмов принятия решений блоков регистрации и анализа изображений. Испытания и отработка алгоритмов чаще всего выполняются в натурных условиях при значительных материальных и временных затратах. Одной из задач метрологического обеспечения ОЭА является задача создания устройств имитации фоно-целевой обстановки (ФЦО) [2, 3]. Специальное программное обеспечение таких устройств позволяет имитировать цели различных размеров с требуемой детальностью фрагментов и на различном окружающем фоне.

Наиболее предпочтительным типом устройств имитации ФЦО на сегодняшний день представляются системы, основанные на применении широтно-импульсной модуляции (ШИМ) оптического излучения [4]. Типовые устройства, использующие технологию ШИМ, как правило, включают в себя источник излучения, осветительную систему, микрозеркальную матрицу, выходной объектив.

В АО «НПО ГИПО» выполнен ряд научно-исследовательских работ по разработке устройств имитации ФЦО, формирующих изображения объектов в различных спектральных диапазонах. В рамках дальнейшего развития таких устройств необходимо решить несколько задач. Одной из наиболее актуальных на сегодняшний день является необходимость повышения эффективности применения микрозеркальных матриц в дальнем инфракрасном диапазоне. Другой актуальной задачей является синхронизация частоты ШИМ в создаваемом имитационном изображении с частотой электронного блока ОЭА. Также необходимо изыскать пути повышения предельных технических характеристик выходных объективов, в частности, диаметра выходного зрачка и поля зрения, что позволит увеличить номенклатуру исследуемых изделий.

Решение вышеуказанных задач позволит повысить качество имитационных изображений и достоверность исследований с применением устройств имитации ФЦО, расширить их функциональные возможности и область применения.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 453 с.

2. *Васильев Д. Ю., Курт В. И., Егошин Д. А.* К вопросу разработки стендов имитационного моделирования // Вестник метролога. 2020. № 3. С. 27–32.
3. *Гибин И. С., Колесников Г. В.* Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов (обзор) // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 293–302.
4. *Гибин И. С., Козик В. И., Нежевенко Е. С.* Источники излучения для проекторов инфракрасных сцен // Прикладная физика. 2019. № 2. С. 67–73.

УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ СПЕКТРОКОМПАРАТОР

Д. А. Егошин, В. И. Курт, Д. Ю. Васильев

АО «НПО ГИПО», г. Казань
e-mail: gipo@shvabe.com

Аннотация. В докладе, посвященном ультрафиолетовому спектрокомпаратору, представлены результаты его применения.

При разработке, изготовлении, настройке, испытаниях и эксплуатации оптико-электронных приборов (ОЭП), работающих в ультрафиолетовой (УФ) области спектра, требуется подтверждение или проверка их технических характеристик и функционирования. Для этих целей, в первую очередь, применяются источники излучения с подтвержденными характеристиками в заданном спектральном диапазоне. В качестве таких источников излучения чаще всего используются точечные источники излучения, например, лампы, и коллимированные источники излучения, характеристики которых должны быть нормированы в заданном спектральном диапазоне.

Помимо этого возникает необходимость измерения характеристик применяемых в ОЭП фотоприемников, а также определение чувствительности ОЭП в целом.

В метрологии сличение источников излучения с эталонными, как правило, проводится с помощью спектрокомпараторов. В АО «НПО ГИПО» разработан спектрокомпаратор, включающий в себя оптическую систему, обеспечивающую сличение точечных и коллимированных источников излучения с эталонными по спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ), спектральной плотности силы излучения (СПСИ), спектральной плотности энергетической освещенности (СПЭО), а также измерение чувствительности приемников излучения и ОЭП в целом.

Проведено сличение источников излучения на спектрокомпараторе по указанным выше спектроэнергетическим величинам.

Установлено, что в диапазоне длин волн от 0,25 до 0,4 мкм спектрокомпаратор позволяет проводить сличение:

- по СПЭЯ в диапазоне от $1 \cdot 10^6$ до $2,93 \cdot 10^{10}$ Вт / м³ · ср;
- по СПСИ в пределах от $1,001 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^2$ Вт / (м · ср);
- по СПЭО в пределах от $4,9 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^3$ Вт/м³.

Измерения, проведенные с помощью спектрокомпаратора, позволили оценить погрешность измерения относительной спектральной характеристики чувствительности (ОСХЧ) приемников излучения методом сличения двух кремниевых фотодиодов, прошедших калибровку во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, один из которых принят за эталонный приемник излучения.

Определено, что погрешность измерения ОСХЧ приемников излучения на спектрокомпараторе не превышает 3 %.

На спектрокомпараторе также проведено определение ОСХЧ ультрафиолетового фотометра методом сличения сигналов фотометра с сигналами образцового приемника излучения, ОСХЧ которого известна [1].

Результаты измерений позволили сделать вывод, что спектрокомпаратор позволяет проводить определение спектральных характеристик чувствительности приемников излучения и ОЭП.

Таким образом, подтверждена возможность применения спектрокомпаратора при разработке, изготовлении, настройке, испытаниях и эксплуатации ОЭП, работающих в УФ области спектра.

Литература

1. Егошин Д.А., Алешко Е.И., Лаврухин В.П., Курт В.И., Васильев Д.Ю. Аппаратура для измерения энергетической яркости и энергетической освещенности источников в ультрафиолетовом диапазоне спектра // Сборник трудов XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики — 2019». СПб, 2019. С. 189–191.

ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОАПЕРТУРНОЙ МОДЕЛИ ЧЕРНОГО ТЕЛА В СОСТАВЕ СТЕНДА ТЕРМОВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*В. Н. Васильев, А. А. Гулько, К. В. Жданов,
П. М. Линский, Н. В. Никитин, В. С. Сиразетдинов*

АО «НИИ ОЭП»
e-mail: nikitinnv@niioep.ru

Аннотация. Выполнена калибровка по энергетической яркости и измерены другие радиометрические характеристики широкоапертурной модели черного тела (ШМЧТ) диаметром 380 мм в условиях вакуума и диапазоне температур от +40 °С до –20 °С. Представлена смонтированная в вакуумной камере стенда ВК-150 измерительная установка для осуществления калибровки методом сравнения энергетической яркости излучения ШМЧТ и яркости более точной полостной модели черного тела.

Широкоапертурная модель черного тела (ШМЧТ) в составе стенда термовакuumных испытаний ВК-150М (АО «НИИ ОЭП») предназначена для калибровки по энергетической яркости оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) зондирования Земли из космоса. ШМЧТ при калибровке размещают вблизи входного зрачка оптической системы ОЭА, что обеспечивает практически равную засветку каждого элемента фотоприемной матрицы, расположенной в фокальной плоскости объектива. В такой схеме калибровки каждый элемент матрицы принимает сигнал со всей излучающей поверхности ШМЧТ, ограниченной размером входного зрачка.

На первом этапе калибровки ОЭА должна быть выполнена радиометрическая калибровка самой ШМЧТ, которую осуществляют методом сравнения (компарирования) характеристик излучения ШМЧТ и характеристик излучения более точной полостной модели черного тела (ПМЧТ). В докладе представлена смонтированная внутри вакуумной камеры стенда измерительная схема (компаратор), включающая ШМЧТ, ПМЧТ и оптическую схему с зеркальным модулятором, переключающим поступающее на яркомер компаратора излучение от ПМЧТ и от ШМЧТ.

В результате измерений радиометрических характеристик ШМЧТ диаметром 380 мм, изготовленной во ВНИИОФИ (г. Москва) [1], получены:

- калибровочные кривые, т.е. зависимости яркостной температуры ШМЧТ от установочной в диапазоне от +40 °С до –22 °С при температурах тепловых экранов компаратора, формирующих фон, +25 °С и –25 °С;
- определены значения энергетической яркости ШМЧТ в диапазоне длин волн 2,5–4,5 мкм, неравномерность энергетической яркости по площади излучающей поверхности не превышает 0,2 % (на диаметре 340 мм) в рабочем диапазоне температур;
- угловая зависимость энергетической яркости ШМЧТ, приведенная к значению яркости в направлении нормали к излучающей поверхности и подтверждающая, что в пределах ± 37 угл. град. поверхность можно считать ламбертовской.

Измерения выполнялись в условиях вакуума ($\sim 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.) в спектральной полосе чувствительности охлаждаемого фотоприемника яркомера.

Литература

1. Довгилов Н. Л., Морозова С. П., Алексеев С. В. и др. Вакуумная широкоапертурная модель черного тела в диапазоне температур 223,15–423,15 К для радиометрической калибровки ОЭА наблюдения Земли // Измерительная техника. 2023. № 8. С. 60–66.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СТЕНДОВОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ КОЛЛИМАТОРОВ С ТЕСТ-ОБЪЕКТАМИ ВИДА ЦЕЛЕЙ

А. С. Бочкова, А. С. Гук

ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева»
e-mail: a.bochkova@zenit-kmz.ru

Аннотация. В работе представлены образцы тест-объектов вида целей на примере реальных объектов наблюдения (мишени №№ 12, 12а, 12б и различных предметов) на внеосевом отражающем коллиматоре со спектральным диапазоном работы 0,4÷15 мкм.

В настоящее время проверка оптических и оптико-электронных приборов различного назначения проводится на стендовом испытательном оборудовании со стандартизированными размерами миры на базе коллиматоров импортного производства [1].

Большинство фирм-разработчиков оптико-электронных устройств при подтверждении разрешающей способности телевизионных и тепловизионных систем используют стандартные миры [2]. Данный способ понятен разработчикам, может быть количественно выражен в виде нужного размера миры, понятно оценены характеристики обнаружения и распознавания как визуально, так и количественно, например, с помощью требований по контрасту [3, 4]. Однако в эксплуатации основными объектами являются такие целевые объекты, как человек, машина, щит 2,3×2,3 метра (стандарт НАТО) и другие (в зависимости от задачи).

В ряде задач, связанных с техническим зрением, удобно и информативно использовать критерий обнаружения и распознавания по количеству пикселей, которые укладываются на объекте. Данный критерий необходимо дополнить следующими условиями: изображение должно быть четким, резким, не размытым. Критерии разрешения одного пикселя удобнее переводятся и интуитивно понятны для эксплуататоров.

В задачах, связанных с непосредственным участием оператора (например, авиационных), для обнаружения и распознавания объекта с целью наглядности и достоверности проверки качества изображения наблюдаемого объекта предлагается использовать тест-объекты мишеней и предметов с размерами, имитирующими дистанции удаления целей от наблюдателя (например, человек на дистанции 2 км). При использовании коллиматоров с тест-объектами необходимо также имитировать весь электронный тракт со всеми штатными соединениями, включая экран вывода информации, расстояния от экрана до глаз и допустимую фоновую освещенность.

Зеркальные коллиматоры обладают рядом преимуществ, таких как большой спектральный диапазон — 0,15–15 мкм, позволяют осуществлять проверки одновременно телевизионных и тепловизионных каналов, проводить сведение с лазерно-лучевыми каналами управления. Перспективным является также введение в качестве миры для телевизионных каналов экранов микродисплеев [5].

Литература

1. Компания CI-Systems: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: http://www.ci-systems.com/METS-12-1_6. (дата обращения: 17.07.2024).
2. ГОСТ 15114-78. Системы телескопические оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 30.01.78 №284. Переиз-

дание (март 1999 г.) с Изменением №1, утвержденным в мае 1988 г. (ИУС 8-88). Москва: Издательство стандартов, 1999. 8 с.

3. ГОСТ 21815.18-90. Преобразователи электронно-оптические. Метод измерения пространственной частотно-контрастной характеристики. Разработан и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 29.12.90 №3725. Москва: Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1991. 19 с.
4. ГОСТ 25024.5-87. Индикаторы знаковосинтезирующие. Методы измерения собственного яркостного контраста и неравномерности собственного яркостного контраста. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23 июня 1987 №2287. Москва: ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 1987. 15с.
5. ООО «Оптехника»: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.op-totekhnika.ru/izn> (дата обращения: 08.08.2024)

СТЕНД ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОТОПРИЕМНИКОВ С КОДОМ ГРЕЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. В. Карпов, М. Е. Козырев, А. В. Марущенко, В. И. Петренко, Е. В. Сусов

АО «Московский завод «САПФИР»
e-mail: info@mzsaphir.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты работы по созданию стенда для измерения параметров охлаждаемых многоэлементных фотоприемников (ФП) с кодом Грея [1–3] в условиях воздействия лазерного излучения.

Стенд включает в себя:

- импульсно-периодический CO_2 -лазер «Инфра-Лайт-100»;
- объектив БЛ5.920.165ЛЗ;
- ослабитель излучения ступенчатый;
- контрольный фотоприемник PD10M2;
- источники питания АТН-1031;
- усилитель измерительный У28;
- осциллограф измерительный TDS2000C.

Характеристики фотоприемника:

- спектральный диапазон чувствительности — 2,0–11,5 мкм;
- размер фоточувствительной зоны — 6×12 мм;
- количество элементов — 36;
- разброс сигналов по площадкам ФЧЭ — не более 15 %;
- охлаждающее устройство — двухкаскадный ТЭО;
- максимальная потребляемая мощность — не более 10 Вт;
- диапазон рабочих температур — от -50°C до $+55^\circ\text{C}$;
- масса — 43 г.

В процессе комплексных испытаний опытных образцов ФП был создан стенд, на котором исследовалась работоспособность ФП при максимальной облученности 10^{-4} Дж/см² и ширине полосы лазерного излучения 300 мкм на длине волны 10,6 мкм, в том числе измерялось отношение сигнала к шуму на выходе ФП при минимальной облученности 10^{-8} Дж/см².

Проведенные на созданном стенде предварительные испытания опытной партии образцов позволяют признать опытные образцы соответствующими требованиям ТЗ. По своим характеристикам фотоприемники, созданные из гетеро-эпитаксиальных структур КРТ, не имеют отечественных аналогов и по своим параметрам находятся на уровне лучших зарубежных образцов.

Литература

1. Гиндин П. Д. и др. Фоторезистор с кодом Грея из гетеро-эпитаксиальных структур КРТ для регистрации импульсного излучения CO_2 лазера // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: ОАО «НПО «Орион», 2014.
2. ТУ 6349-022-07539943-2014. Фотоприемник многоэлементный.
3. Патент на полезную модель № 153455, 2015. Приемник излучения с термоэлектрическим охлаждением. А. В. Филатов, Н. С. Кузнецов, П. Д. Гиндин, В. В. Карпов, М. Е. Козырев, В. И. Петренко, опубликовано 20.07.2015.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХКООРДИНАТНОГО АВТОКОЛЛИМАТОРА С МАТРИЧНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ И МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ МАРКОЙ

И. Л. Ловчий

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
e-mail: lovchy@niioep.ru

Аннотация. Представлены результаты моделирования точностных параметров двухкоординатного автоколлиматора (АК) с матричным фотоприемником и одно- и многоэлементной маркой. Показана возможность проведения высокоточных измерений в широком угловом диапазоне при значительной дистанции до контролируемого зеркала.

Для типичного АК с маркой в виде осевой диафрагмы с увеличением дистанции до контролируемого зеркала диапазон угловых измерений сужается, а погрешность измерений по краям диапазона увеличивается за счет систематической составляющей, обусловленной виньетированием отраженного от зеркала светового пучка на оправе объектива и абберрационными искажениями наклонного пучка при прохождении линз объектива.

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования точностных параметров АК с маркой в виде круглой осевой диафрагмы диаметром 30 мкм. Числа у кривых соответствуют дистанции до зеркала (м), разворот зеркала осуществляется одновременно по двум направлениям. Моделирование проводилось методом Монте-Карло с последовательной трассировкой случайных лучей через все элементы оптического тракта АК. Для создания компьютерной модели АК использовалась среда программирования LabVIEW. В качестве объектива рассматривался линзовый дуплет дифракционного качества с апертурой 50 мм и фокусным расстоянием 500 мм.

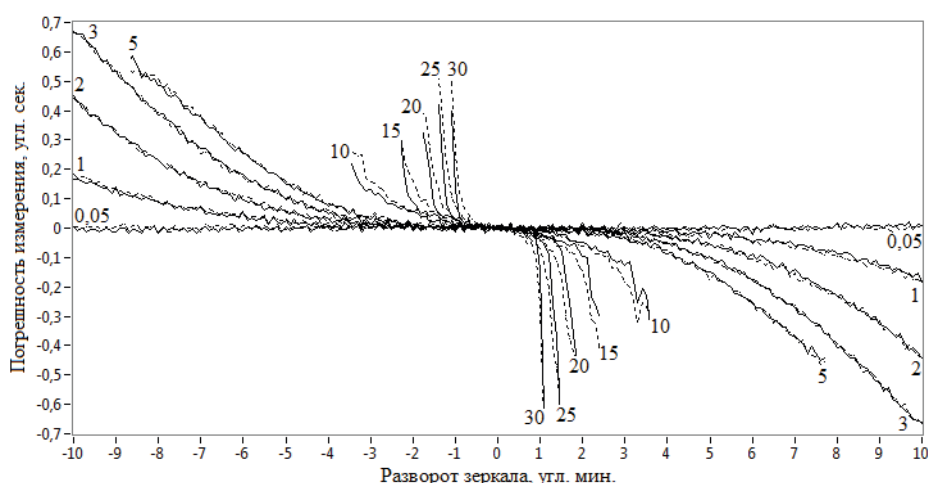


Рис. 1. Расчетные точностные параметры АК с маркой в виде круглой осевой диафрагмы

Результаты моделирования хорошо коррелируют с заявленными точностными характеристиками цифровых автоколлиматоров ведущих фирм-производителей при близких параметрах объективов (апертура, фокусное расстояние).

Диапазон точных угловых измерений на большом расстоянии до контролируемого зеркала может быть значительно расширен при использовании в АК многоэлементной «окрашенной» марки с адаптивным выделением и анализом изображения «базового» элемента марки, световые лучи от которого падают на зеркало под минимальным углом.

Обратно отраженные от зеркала лучи проходят без виньетирования через центр объектива с минимальными абберрационными искажениями. Положение центра тяжести изображения «базового» элемента в плоскости приемника слабо зависит от расстояния до зеркала.

На рис. 2 представлены результаты моделирования точностных параметров АК с многоэлементной «окрашенной» маркой из сетки элементов диаметром 30 мкм при расстоянии до зеркала 1 м (круглые черные точки) и 30 м (серые квадратные точки). Шаг сетки элементов изменялся от 100 мкм (по центру марки) до 34 мкм (на краях марки) с дискретностью 3 мкм. Общий размер марки — 3,112×3,112 мм, количество элементов в марке — 2209. Диаметр контролируемого зеркала — 255 мм.

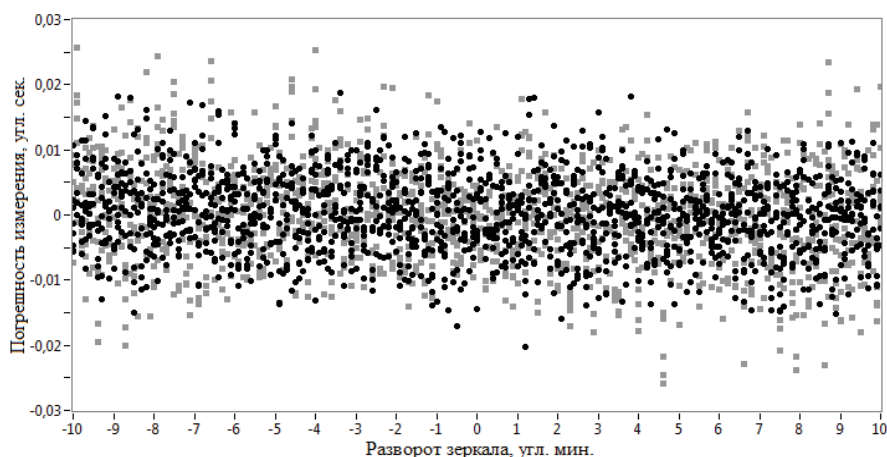


Рис. 2. Результаты моделирования точностных параметров АК с многоэлементной «окрашенной» маркой

Результаты моделирования показывают, что погрешность угловых измерений АК с многоэлементной маркой имеет случайный характер (без систематической составляющей) и практически не зависит от расстояния до контролируемого зеркала. Размер зеркала определяется условием попадания в его апертуру лучей от базового элемента марки и нескольких соседних элементов. Максимальная дистанция измерений ограничивается условием идентификации видимых на приемнике пятен и определяется размером апертуры объектива и максимальным шагом сетки элементов марки автоколлиматора. Ширина диапазона высокоточных измерений определяется размерами зеркала, марки и приемника [1].

Литература

1. Ловчий И. Л. Моделирование параметров двухкоординатного автоколлиматора с многоэлементной маркой и матричным фотоприемником // Оптический журнал. 2024. № 91(1). С. 49–65.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРОГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

В. Н. Васильев, Л. А. Васильева, И. С. Миронов, Д. Д. Шестаков

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
e-mail: vasilievvn@niioep.ru

Аннотация. Измерены пороговые характеристики Фурье-спектрорадиометра инфракрасного диапазона и выполнена оценка его применимости для измерений характеристик излучения длиннофокусных коллиматорных стенов в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне.

При проведении испытаний оптико-электронных приборов дистанционного зондирования Земли широко применяются коллиматорные стеноды, обеспечивающие формирование в поле зрения испытуемых приборов тестовых объектов с заданными пространственными и энергетическими характеристиками. Такие стеноды в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне должны обеспечивать формирование излучения от тестового объекта со спектральной плотностью энергетического потока до $4 \cdot 10^{-12}$ Вт/мкм и более [1]. Прямые измерения спектральных плотностей энергетического потока зачастую не проводятся из-за отсутствия соответствующих средств измерений и оцениваются расчетным методом.

В НИИ ОЭП изготовлен макетный образец Фурье-спектрорадиометра на основе Фурье-спектрометра ФСМ-1201 (пр-во «Инфраспек», Санкт-Петербург) со спектральным разрешением до 1 см^{-1} , охлаждаемого до 100 К фотоприемного устройства для спектрального диапазона 2–14 мкм МСТ-13-1.00 (пр-во InfraRed associates, США), зеркального объектива ВК-800 с входным зрачком 200 мм.

Разработаны методики калибровки пороговых характеристик спектрорадиометра и измерений характеристик оптического излучения коллиматорных стенов с использованием спектрорадиометра.

Определена пороговая спектральная плотность энергетического потока для спектрорадиометра при различных его параметрах, в числе которых: спектральное разрешение, количество циклов измерений, рабочий спектральный диапазон. Например, при спектральном разрешении 8 см^{-1} , количестве циклов измерения 20, в спектральном диапазоне 2,2–4,0 мкм пороговая спектральная плотность энергетического потока составила $5 \cdot 10^{-9}$ Вт/мкм (рис. 1).

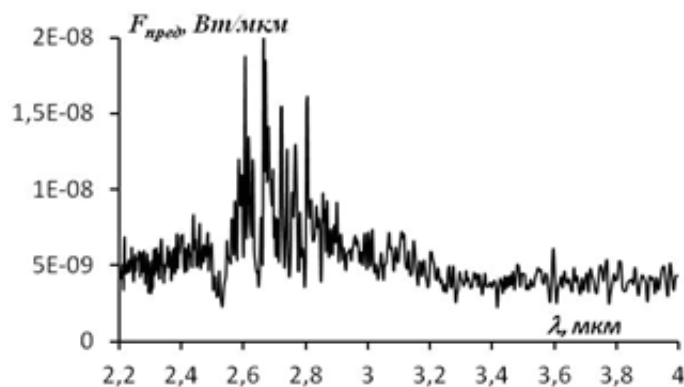


Рис. 1. Спектральная зависимость пороговой спектральной плотности потока

Методика применения спектрорадиометра для измерения характеристик излучения коллиматорных стенов обеспечивает повышение достоверности и точности измерений за счет использования протяженной модели черного тела, располагаемой в плоскости установки входного зрачка испытуемого оптико-электронного прибора, совмещенной с входным зрачком спектрорадиометра.

Литература

1. *Дмитриев И. Ю.* Методы энергетической калибровки многоканальных сканирующих оптико-электронных приборов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 11. С. 42–46.

РАЗРАБОТКА УЗЛА ОСВЕТИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПТОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОЛНЦЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

А. Г. Бельченко, Л. А. Глущенко, А. М. Гудкова, К. А. Иванов, О. А. Лебедев

АО «НИИ ОЭП»
e-mail: glushhenkola@niioep.ru

Аннотация. В этой работе представлен вариант разработанного фокального узла, устанавливаемого на оптической скамье в составе испытательного коллиматорного стенда, обеспечивающего измерения энергетических характеристик крупногабаритных оптических приборов.

Имитация фоновой обстановки на испытательных стендах сталкивается с различного рода сложностями, наибольшую из которых представляет имитация солнечной засветки с высокими энергетическими характеристиками, а также с широким диапазоном значений освещенности. Это связано с жесткими требованиями к солнцезащитным устройствам (экранам, светофильтрам, блендам и т.д.) в части подавления паразитных фоновых засветок. Для измерения степени подавления излучения устройством типа бленды на испытательном стенде необходимо создать фокальный узел, состоящий из высокоэнергетического источника излучения и конденсора с большим углом охвата, позволяющего получить высокие уровни освещенности исследуемого объекта, а также высокочувствительное фотоприемное устройство, позволяющее фиксировать высокую степень подавления засветок.

На рис. 1 приведена оптическая схема конденсора и набора из 11 светофильтров (поз. 3–13), позволяющая реализовать набор уровней облученности исследуемого оптического узла, различающихся на несколько порядков в видимом диапазоне. Конденсор, содержащий 2 линзы (поз. 1 и 14), характеризуется большим углом охвата потока излучения, составляющим 62° , что позволяет получать высокие уровни освещенности в оптической скамье ЮС-77 [1].

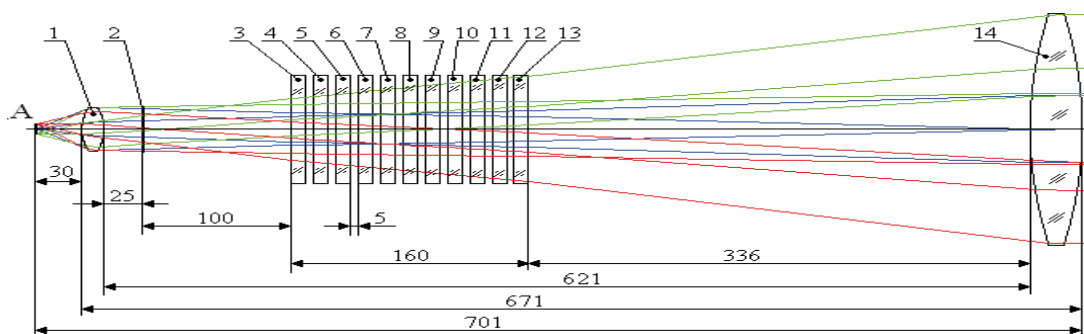


Рис. 1. Оптическая схема конденсора

Использование набора светофильтров позволяет регулировать уровень освещенности и тем самым добиться широкого диапазона значений этой величины. Для проверки уровня подавления фоновой засветки исследуемым объектом на выходе испытательного стенда располагается высокочувствительное фотоприемное устройство.

Литература

2. Оптическая скамья ЮС-77 [Электронный ресурс]. URL: <https://niioep.ru/pages/n-k-isp-opt.html>, (дата обращения 25.10.2024).

СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТИ КОЛЛИМИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

В. Н. Васильев, Л. А. Васильева, И. С. Миронов, К. А. Томеев

Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения
e-mail: vasilievvn@nioep.ru

Аннотация. Проведены сравнительные оценки результатов измерений спектральной плотности энергетической яркости и облученности коллимированных источников излучения с использованием спектрорадиометра с результатами, полученными расчетным методом.

Коллимированные источники излучения широко применяются при испытаниях оптико-электронных приборов, обеспечивая заданные энергетические уровни засветок испытываемых приборов в рабочем спектральном диапазоне. В большинстве случаев из-за отсутствия средств измерения с требуемыми параметрами оценка значений энергетической засветки производится с использованием расчетных методов [1].

Проведены расчетные оценки значений спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) и облученности коллимированного стенда ВК-1000 с фокусным расстоянием 1000 мм, в качестве излучателя в котором используется модель черного тела (МЧТ) М315х8НТ [2]. Расчеты выполнены для диапазона длин волн от 2,5 до 4,5 мкм на основе данных об элементах коллиматорного стенда: температуре МЧТ, геометрических размерах диафрагм тестовых объектов, коэффициентов пропускания (отражения) оптических элементов и поглощения атмосферной трассы.

Выполнены прямые измерения СПЭЯ и облученности коллимированного источника излучения ВК-1000 с использованием спектрорадиометра инфракрасного диапазона на основе Фурье-спектрометра ФСМ-1201 с охлаждаемым фотоприемным устройством МСТ-13-1.00 и зеркальным объективом ВК-800.

На рис. 1 и рис. 2 приведены результаты прямых измерений и расчетов СПЭЯ в спектральном диапазоне 2,5–4,5 мкм коллиматорного излучателя ВК-1000 при разных температурах МЧТ.

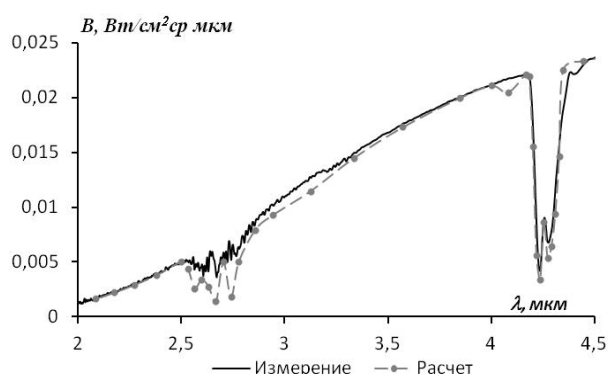


Рис. 1. СПЭЯ ВК-1000 при $T_{\text{МЧТ}} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

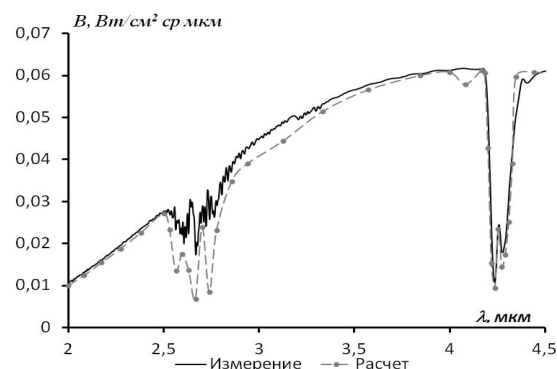


Рис. 2. СПЭЯ ВК-1000 при $T_{\text{МЧТ}} = 416\text{ }^{\circ}\text{C}$

При $T_{\text{МЧТ}} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ измеренное значение облученности в плоскости выходного зрачка коллиматора составило: $\epsilon_{\text{изм}} = 6,88 \cdot 10^{-11}\text{ Вт/см}^2$, рассчитанное $\epsilon_{\text{расч}} = 6,56 \cdot 10^{-11}\text{ Вт/см}^2$. При $T_{\text{МЧТ}} = 416\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\epsilon_{\text{изм}} = 2,31 \cdot 10^{-10}\text{ Вт/см}^2$, $\epsilon_{\text{расч}} = 2,17 \cdot 10^{-10}\text{ Вт/см}^2$.

Литература

1. *Панфилов А. С., Гаврилов В. Р., Иванов В. С. и др.* Новая эталонная база России для радиометрической калибровки оптической аппаратуры наблюдения Земли и оценка возможных уровней точности получаемых радиометрических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 303–309.
2. *Васильев В. Н., Васильева Л. А., Дмитриев И. Ю. и др.* Исследование излучательных характеристик моделей абсолютно черного тела с плоским и полостным излучателем // Сборник тезисов XV Международной конференции «Прикладная оптика — 2022». СПб.: ООО «Скифия-принт», 2023. С. 225.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ОКСИДНЫЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ВЫСОКО ОТРАЖАЮЩИХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИХ СОЗДАНИЯ

В. В. Азарова

АО «Научно-исследовательский институт “Полюс” им. М. Ф. Стельмаха»

e-mail: azarova_v_v@mail.ru

Аннотация. В докладе приводятся и обсуждаются специальные методы и оборудование для измерения рассеяния, поглощения и фазовой анизотропии прецизионных, высоко отражающих лазерных зеркал. Рассмотрены требования к параметрам прецизионных оптических поверхностей, приводятся результаты контроля при химико-механической финишной полировке оптических поверхностей в сравнении с результатами измерений при обработке ионными пучками. Проводится сравнение метрологических методов, с помощью которых можно оценивать поверхности такого качества.

Требования, предъявляемые к параметрам прецизионных оптических поверхностей и лазерных зеркал, применяемых в интерферометрических приборах, очень высокие [1]. Так, коэффициенты отражения зеркал для некоторых применений должны достигать значений 99,999 % или, другими словами, потери на рассеяние излучения и на поглощение в слоях покрытия не должны превышать уровня 10 ppm. В некоторых лазерных измерительных приборах, в которых измеряемый сигнал формируется в самом лазерном резонаторе, к ним предъявляется дополнительное требование минимального рассеяния назад «в моду резонатора» и определенные требования к фазовой анизотропии [2].

Для достижения такого уровня зеркальных покрытий требуется создание высококачественных оптических поверхностей подложек зеркал. В докладе приводятся результаты контроля при химико-механической финишной полировке оптических поверхностей, они сравниваются с результатами измерений при обработке ионными пучками, в частности, кластерными ионными пучками [3, 4]. Проводится сравнение метрологических методов, с помощью которых можно оценивать поверхности такого качества. Анализируются результаты измерений методами интерферометрии «белого» света (WLI), атомно-силовой микроскопии (AFM), методами светового рассеяния — интегрального (TIS) и дифференциального (ARS). Сравнение результатов измерений проводится с помощью функций спектральной плотности мощности (PSD-функций) и эффективных высот шероховатости в заданных диапазонах пространственных частот. Обработка оптических поверхностей кластерными ионными пучками приводит к улучшению поверхности в диапазоне пространственных частот микропрофиля. При этом рассеяние светового излучения на таких поверхностях практически не уменьшается. Однако, как показали эксперименты, при последующем нанесении многослойного отражающего покрытия на такие подложки величина PSD-функции поверхности с зеркальным покрытием уменьшается в диапазоне пространственных частот больше величины 1/мкм.

Изложенные требования к параметрам высокоотражающих лазерных зеркал достигаются путем нанесения интерференционных покрытий методом ионно-лучевого распыления (IBS). Этот метод характеризуется высокой адгезией благодаря высоким энергиям осаждения (от 10 до 20 эВ), высокой стабильностью параметров напыления благодаря высокой плотности упаковки атомов. В докладе приводятся и обсуждаются специальные методы и оборудование для измерения рассеяния, поглощения и фазовой анизотропии прецизионных, высоко отражающих лазерных зеркал.

Литература

1. *Mavalvala N.* Gravitational Wave Detectors of the Future: Beyond the First LIGO Discoveries. MIT, CLEO-Invited speaker, USA, 2016.
2. *Stedmany G.E.* Ring-laser tests of fundamental physics // Rep. Prog. Phys. 1997. Vol. 60. P. 615–688.
3. *Bakun A.D., Gusev A.S., Kargin N.I., Ryndya S.M., Siglovaya N.V.* Method of formation of super-smooth optical surfaces using GCIB and ANAB processing // Applied Surface Science [Электронный ресурс]. URL: <https://www.elsevier.com/locate/apsusc>, (дата обращения 25.10.2024).
4. *Andreev A.A., Chernysh V.S., Ermakov Yu.A., Ieshkin A.E.* Design and investigation of gas cluster ion accelerator // Vacuum. 2013. No. 91. P. 47.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ОБРАЗЦОВ В ИК-ОБЛАСТИ

В. С. Костров, Н. Т. Шардаков, Л. В. Жукова

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: Kostrov-v-s@yandex.ru

Аннотация. В данной работе представлен результат разработки схемы установки для регистрации спектров люминесценции в ближней и средней инфракрасной (ИК) области. Для работы установки написана программа для ЭВМ, позволяющая автоматизировать процесс измерения интенсивности ИК-излучения образца.

Регистрация спектров люминесценции новых оптических материалов, особенно в ИК-области спектра, представляет собой непростую задачу из-за требований к высокой чувствительности, необходимости в подборе оборудования и разработке установок для измерения спектральных и оптических характеристик. В частности, подобная задача регистрации спектров люминесценции и сцинтилляции в ближней и средней ИК-областях актуальна и для новых монокристаллов и оптической керамики на основе галогенидов металлов [1].

Была разработана установка для измерения спектра излучения образцов. Для измерения интенсивности ИК-излучения использовался КРТ-детектор компании InfraRed Associates Inc. с диапазоном чувствительности 2–24 мкм в связке с осциллографом Rigol DS1102E для отображения интенсивности падающего на матрицу детектора излучения. Для выделения определенной длины волны спектра использовался монохроматор Zolix Omni-λ300i с дифракционной решеткой для диапазона 2,5–8 мкм. Для автоматизации процесса измерения была написана программа на языке программирования Python, которая позволяет с заданными диапазоном длин волн и шагом производить измерения интенсивности, формировать файл с данными измерения в виде таблицы и строить график спектра излучения исследуемого образца на основании полученных табличных значений.

Разработанная установка была использована для измерения спектра излучения лампы накаливания (рис. 1). Пик ее излучения находится на 3.6 мкм и не является основным, поскольку максимум излучения лампы накаливания приходится приблизительно на 0.9–1 мкм. Данный результат измерения можно считать положительным, однако работы по настройке установки и программы продолжаются.

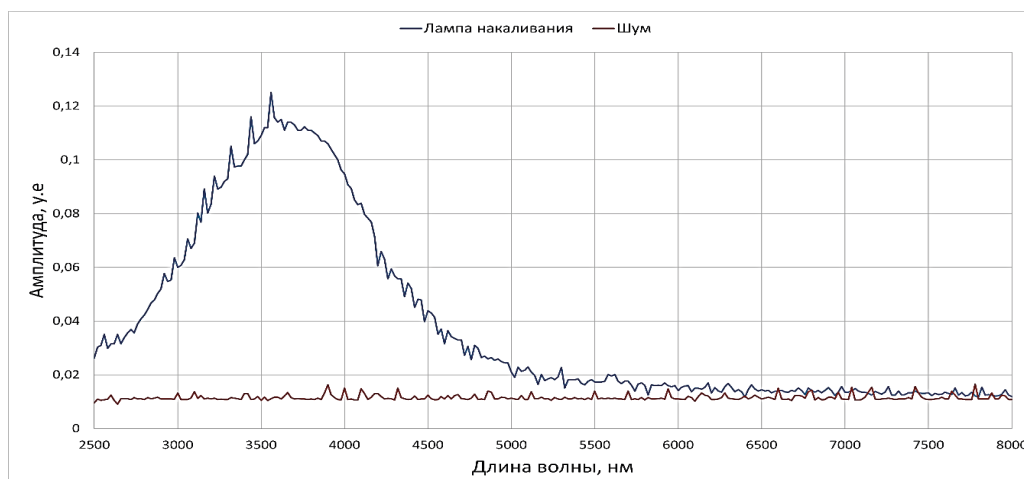


Рис. 1. Спектр лампы накаливания

Литература

1. Yuzhakova A., Lvov A., Salimgareev D., Pestereva P., Yuzhakov I., Kondrashin V., Kabykina E., Kucherenko F., Zhukova L. Optical properties of crystalline materials based on $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – $\text{TlCl}_{0.74}\text{Br}_{0.26}$ and $\text{AgCl}_{0.25}\text{Br}_{0.75}$ – $\text{TlBr}_{0.46}\text{I}_{0.54}$ systems // *Ceram. Int.* 2024. No. 50. P. 21767–21778.

КАЛИБРОВКА ВОЛОКОННОГО ПИРОМЕТРА НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕТОВОДОВ*

Д. А. Воробьева, А. А. Южакова, Л. В. Жукова

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
e-mail: l.v.zhukova@urfu.ru

Аннотация. Была проведена работа по созданию и калибровке волоконно-оптического пирометра с возможностью измерения температур удаленных объектов в широком интервале от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ при источниках с разными коэффициентами черноты в среднем инфракрасном спектральном диапазоне.

В лаборатории волоконных технологий и фотоники на базе УрФУ были разработаны новые высокочистые, нетоксичные, негигроскопичные и пластичные кристаллы на основе галогенидов серебра, которые не обладают эффектом спайности и прозрачны без окон поглощения в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне. Из них были изготовлены поликристаллические ИК-световоды [1], прозрачные в диапазоне 2–27 мкм в зависимости от состава. Целью данного исследования было создание волоконно-оптического пирометра на основе новых поликристаллических световодов для удаленного измерения температуры посредством передачи ИК-сигнала от нагретого объекта по волоконному каналу к приемнику — пирометру, включая калибровку на материалах с известным коэффициентом черноты. Использование подобных приборов предоставляет возможность получать информацию о процессах, протекающих в подвижных средах или механизмах, агрессивных условиях, без контакта с контролируемым объектом и вреда для наблюдателя.

Был изготовлен прибор на основе пирометра DEKO CWQ01, с рабочим диапазоном температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, оптическим разрешением 12:1, с точностью измерений до $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, погрешностью 1,51 %. Из пирометра была удалена фокусирующая френелевская линза. На ее место был установлен поликристаллический галогенидсеребряный световод в РЕЕК-оболочке. С помощью изготовленного прибора измеряли температуру нескольких окружающих объектов с известными коэффициентами черноты (лак, сталь полированная, бумага белая), при комнатной температуре значения составили $22,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ для каждого. Затем сравнили их с показанием спиртового градуировочного термометра, отображающего температуру воздуха в лаборатории, — значения оказались равными в пределах погрешности. Для получения температурных зависимостей принимались также различные объекты с известными степенями черноты. Так, для бруска из нержавеющей стали, покрытой черной матовой краской, размерами $65\times 40\times 7\text{ мм}$, коэффициент черноты принимался соответствующим черной матовой краске — 0,97. Объект равномерно нагревали до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе охлаждения объекта измеряли его температуру с шагом $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. На основе полученных данных была построена зависимость при заданных температурах и получена калибровочная зависимость. В результате был создан волоконно-оптический пирометр, который является идеальным кандидатом для бесконтактного измерения температур удаленных объектов в диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$.

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Программы развития Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в соответствии с программой стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Литература

1. *Yuzhakova A., Salimgareev D., Lvov A., Korsakov A., Zhukova L.* Infrared fibers manufacture from single crystals of the AgBr–AgI system // Opt. Mat. 2022. No. 131. P. 112687.

Секция 6

НАНО- И БИОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОДУЛЯТОР ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

*В. В. Беляев^{1, 2}, Т. Ф. Камалов¹, А. С. Соломатин¹, Ю. Т. Камалов¹,
М. П. Петрушинин², А. Д. Латипов¹, А. А. Пасынков¹, А. А. Беляев¹*

¹ ФГАОУ ВО «Государственный университет просвещения»

² Российский университет дружбы народов

e-mail: vv.belyaev@guppros.ru

Аннотация. В настоящее время перспективным является выполнение квантовых вычислений на основе оптических элементов, в том числе на основе жидких кристаллов [1]. Нами решается задача построения и практической реализации квазиклассического управления запутанными кубитами квантового компьютера. Впервые разработана модель солитона в жидком кристалле и предложено формировать кубит на основе не твердотельного материала, а жидkokристаллического оптического элемента. Получено положительное решение по заявке на патент Российской Федерации «Жидkokристаллический оптический элемент для квантовых вычислений» [2]. Рассчитано прохождение поляризованного света через слой жидкого кристалла при произвольных углах падения и углах ориентации жидкого кристалла. Эта модель с двумя лучами разной поляризации используется для моделирования разработанной ранее компьютерной программы выполнения квантовых вычислений [3].

Разработана конструкция ЖК пространственного модулятора света (ПМС) для моделирования квантовых вычислений с использованием массива бифотонов, соответствующего 128 кубитам. ПМС представляет собой пассивно управляемую матрицу X строк $\times Y$ столбцов. На матрицу падает пучок света с широкой апертурой, сечение которого соответствует размеру ПМС. В каждом пикселе ПМС происходит разделение пучка света на два луча (обыкновенный и необыкновенный). Это имитирует генерацию бифотона при нелинейно-оптическом эффекте в ЖК. Фазовая задержка $\Delta\Phi$ между обоими лучами может изменяться при подаче электронного сигнала на пиксель ПМС. В зависимости от напряжения смещения на ЖК величина $\Delta\Phi$ изменяется на 1π радиан при изменении напряжения на 0,2 В вблизи порогового напряжения электрооптического эффекта или на 0,7–1 В при напряжении в 3–5 раз больше порогового. Это означает, что в зависимости от дискретности электронного сигнала ЖК слой может формировать пары лучей с малой разницей фаз между ними.

Такие пары лучей являются аналогами бифотонов с различными квантовыми состояниями. Квантовые состояния бифотонов или других систем, задействованных в квантовых вычислениях, например, спинов, могут задаваться с использованием оригинальной программы [3]. В ней применяется квазиклассическое приближение, в котором квантовые состояния системы моделируются с использованием классического компьютера. Такой подход основан на подобии классических и квантовых корреляций,

количественно отличающихся всего в 1,4 раза в двухчастичном варианте теоремы Белла.

К хаотическому процессу $\varphi(t)$, получающемуся при использовании генератора случайных чисел при условии $\varphi(t) = 0$, добавляется хаотическое значение фазы θ в диапазоне $0 - 2\pi$. Модель случайной пары запутанных кубитов является функцией двух переменных $f(t, \theta_{1,2}) = \text{sign}[\sin(\varphi(t) + \theta_{1,2})]$, где $\theta_{1,2}$ соответствует углу ориентации измерительного устройства по отношению к наблюдателю. Таким образом, каждый наблюдатель характеризуется собственным случайным углом ориентации, независимым и не согласующимся с углами для другого наблюдателя. Следовательно, поведение в модели кубита зависит от разницы углов ориентации измерительных устройств наблюдателей: антикорреляция при разности углов $\pm\pi$; отсутствие корреляции при разности углов $\pm\pi/2$; корреляция при разности углов 2π .

Использование представленной функции соответствует представлению кубита в виде сферы Блоха при записи квантовых состояний $U(\theta, \varphi)$ (формула (1)) в виде:

$$U(\theta, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -ie^{-i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} \\ -ie^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} & \cos \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где θ и φ — полярный и азимутальный углы соответственно.

Таким образом, с помощью нашей компьютерной программы мы генерируем квантовое состояние кубита в виде пары углов θ и φ . Далее это состояние кодируется в электрический импульс, адресуемый на определенный пиксель ПМС. Напряжение, приложенное к пикселю, вызывает переориентацию ЖК на некоторый угол. В результате изменяется эффективная величина показателя преломления для необыкновенного луча и генерируется некое заданное значение фазовой задержки $\Delta\Phi$. Таким образом, мы получаем физический аналог квантового состояния кубита в виде пары расходящихся лучей (аналог бифотона), отличающихся фазой в диапазоне $0-1\pi$ радиан.

Управляя напряжением на пикселе ПМС, можно изменять фазу необыкновенного луча и моделировать множество квантовых состояний. Используя анализатор, можно преобразовать набор разных значений $\Delta\Phi$ у разных пикселей ПМС в пространственный набор интенсивности, регистрируемый пиксельной видеокамерой. При этом оптическая схема должна быть устроена так, чтобы пара лучей, сгенерированная каждым пикселем ПМС, попадала не на один и тот же пиксель видеокамеры, а на два соседних пикселя. Далее набор электронных сигналов, сформированный видеокамерой, обрабатывается классическим компьютером.

Таким образом осуществляется компьютерное и физическое моделирование процесса квантового вычисления, имитирующего генерацию бифотонов и обработку их поляризационных состояний.

Литература

1. Kondakova A. V., Kamalov T. F. Simulation of real entangled systems based on the model of a pair of entangled solitons // Liquid Crystals. №11, 2022. P. 218–221.
2. Патент РФ № 2023133771 Российская Федерация. Жидкокристаллический оптический элемент для квантовых вычислений: заявка от 18.12.2023; полож. решение о выдаче патента от 12.09.2024 / Камалов Т. Ф., Беляев В. В., Камалов Ю. Т., Беляев А. А.
3. Evdokimov N., Kamalov T., Kamalov Y. Classical software model of entangled quantum states // Zenodo. 2023.

ГРАНИЦА РАЗДЕЛА ИТО — ОДНОСТЕННЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ: ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОПТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

А. С. Тойка^{1, 2, 3, 4}, М. Г. Воробьев⁵, Н. В. Каманина^{1, 2, 3, 4}

¹ АО «ГОИ им. С. И. Вавилова» / АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² НИЦ — Курчатовский институт (ПИЯФ)

³ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина),

⁴ ООО «Фотофизикс»

⁵ Институт проблем машиноведения РАН

e-mail: astoikka.nano@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследованы оптические свойства границы раздела композитных материалов на основе тонких пленок оксидов индия и олова (ИТО) с одностенными углеродными нанотрубками. Для формирования модификаций ИТО использовался метод лазерно-ориентированного осаждения. Диагностика оптических свойств осуществлялась методом эллипсометрии с использованием моделей Лоренца и эффективной сплошной среды.

В настоящее время тонкие пленки на основе ИТО используются в качестве прозрачных оптических контактов в конструкциях оптоэлектронных устройств. Варьируя величину напряженности электрического поля в процессе лазерно-ориентированного осаждения [1] одностенных углеродных нанотрубок, удается варьировать их глубину имплантации в ИТО, что позволяет перестраивать дисперсионные зависимости коэффициента экстинкции и показателя преломления композитных пленок ИТО (рис. 1).

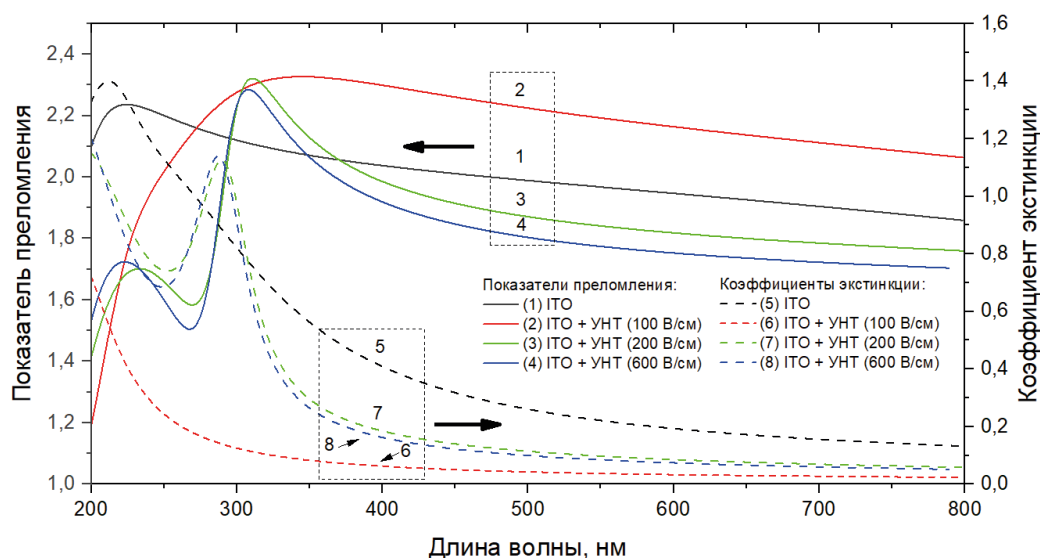


Рис. 1. Спектральные зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции модификаций тонких пленок ИТО

Литература

1. Патент RU 2 405 177 Российская Федерация. С2. Оптическое покрытие на основе ориентированных в электрическом поле углеродных нанотрубок для оптического приборостроения, микро- и нанoeлектроники при нивелировании границы раздела сред: твердая подложка-покрытие: опубл. 27.06.2010 / Каманина Н. В., Васильев П. Я., Студенов В. И.

ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОМЕТРОВЫХ ПЛЕНОК ИТО В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМОВ ИХ ОТЖИГА

А. С. Терехова, С. В. Смирнов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
e-mail: tas18102004@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования электрофизических характеристик нанометровых пленок оксида индия, легированных оловом (ИТО), полученных методом магнетронного распыления из компактной мишени [1], таких как электропроводность, концентрация свободных электронов и положение уровня Ферми при различных режимах отжига.

В данной работе исследовалось изменение электрофизических характеристик пленок после отжига в воздушной среде. Известно, что температура отжига существенно влияет на основные электрофизические параметры пленок ИТО, полученных методом магнетронного распыления. На рис. 1 показаны температурные зависимости электропроводности пленки ИТО при различных режимах отжига.

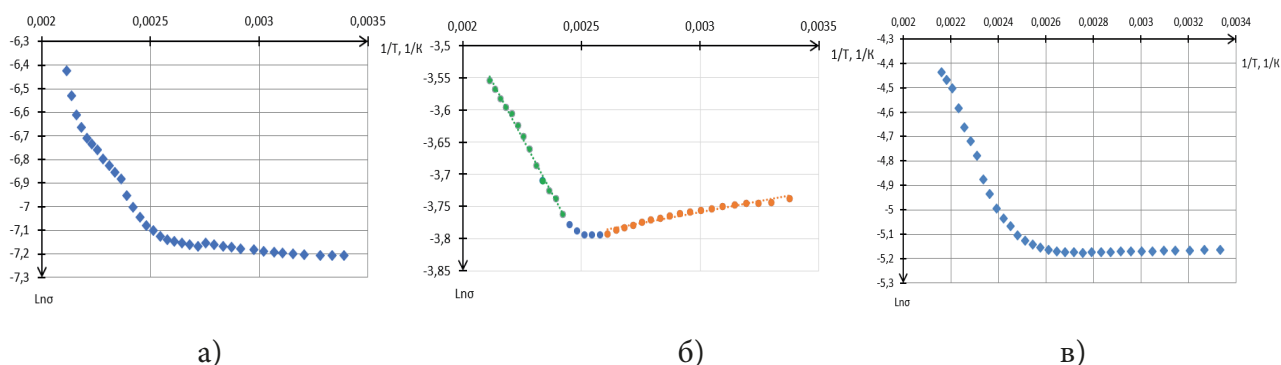


Рис. 1. Зависимости электропроводности от температуры пленок ИТО:
а) без отжига; б) отжиг 400 °С; в) отжиг 700 °С

Из зависимостей следует, что до отжига пленка имеет полупроводниковый характер электропроводности, а после отжига при температуре 400 °С в течение 40 минут он меняется на металлический. При этом было достигнуто наибольшее значение электропроводности, которое составило $10^5 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$. При дальнейшем увеличении температуры отжига наблюдается уменьшение электропроводности.

Методом термо-ЭДС было определено положение уровня Ферми, который в данных пленках находится выше дна зоны проводимости. Далее с использованием формулы Бурштейна — Мосса [2] была вычислена концентрация свободных носителей заряда. При положении уровня Ферми пленки без отжига выше дна зоны проводимости на 0,002 эВ концентрация электронов составила порядка 10^{18}см^{-3} . После отжига при 400 °С уровень Ферми поднимается над дном зоны проводимости на 0,2 эВ, а концентрация возрастает до 10^{20}см^{-3} . После отжига при 700 °С уровень Ферми опускается на расстояние 0,086 эВ над дном зоны проводимости, а концентрация падает до 10^{19}см^{-3} .

Таким образом, показано, что температура 400 °С является оптимальной для пленок ИТО на подложках из кварцевого стекла. Дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к уменьшению количества кислородных вакансий, из-за чего электропроводность снижается.

Литература

1. *Zhidic Y., Ivanova A., Smirnov S., Zhuk K., Ynusov I., Troyan P.* ITO Films for Plasmon Resonance-Based Optical Sensors // *Coatings*. 2022. No. 12. P. 1–11.
2. *Sofi A. H., Shan M. A., Asokan K.* Structural, Optical and Electrical Properties of ITO Thin Films // *Journal of Electronics Materials*. 2018. Vol. 47. No. 2.

ГРАФЕНОВЫЙ УГЛЕРОД КАК СТАБИЛИЗАТОР НАНОЧАСТИЦ КВАРЦА*

Н. Д. Шарпарь^{1, 2}, Н. Н. Рожкова¹

¹ ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск

² ПетрГУ

e-mail: Sharpar99@mail.ru

Аннотация. В работе исследовано влияние графенового углерода на структурные и физико-химические свойства наночастиц кварца шунгитовых пород при помощи рентгеноструктурного анализа и спектроскопии комбинационного рассеяния. Для этого полученные запатентованным способом наночастицы кварца были термообработаны при 400, 600, 900 °С с целью удаления графеноподобного углерода. Приводится анализ изменения свойств наночастиц после обработки.

Наночастицы кремнезема (кварца) вызывают большой интерес из-за своего широкого спектра потенциального применения в материаловедении, катализе, инкапсулировании ферментов, доставке лекарств и в сельском хозяйстве [1]. Как получение, так и дальнейшее использование наночастиц требует их выделения и стабилизации в различных средах, прежде всего в воде для биомедицинского применения.

Основными компонентами шунгитовых пород являются углерод и кремнезем. Комплексные исследования показали, что шунгитовый углерод (ШУ) характеризуется как графеноподобный с базовым структурным элементом ~1 нм. При этом он образует устойчивые водные дисперсии наночастиц, стабилизированных графеновыми фрагментами. Кремнезем представлен α-кварцем с размером кристаллитов примерно 60 нм. Наночастицы ШУ и наноразмерный кварц сохранились в породах и могут быть выделены благодаря коллоидной природе шунгитовых пород и относительно мягким условиям их формирования [2].

Было установлено, что наночастицы ШУ в водных дисперсиях стабилизированы графеновыми фрагментами. Недавно был разработан и защищен патентом экологически безопасный метод получения устойчивых водных дисперсий наночастиц α-кварца шунгитовых пород [3]. Из водных дисперсий капельным методом были получены пленки. В дисперсиях и пленках наночастиц кварца методом комбинационного рассеяния света (КРС) показано присутствие графеноподобного углерода, который по аналогии с дисперсиями наночастиц ШУ может играть роль стабилизатора наночастиц кварца в средах различной полярности [4].

Для оценки влияния графенового углерода на структурные и физико-химические свойства наночастиц кварца, частицы были термообработаны при 400, 600, 900 °С с целью удаления графеноподобного углерода. Изменения свойств наночастиц после термообработки были определены методами РСА, КРС.

Термообработанные наночастицы кварца сохраняют структурные параметры наночастиц α-кварца, но при удалении углерода теряется возможность получения устойчивых водных дисперсий на основе наночастиц.

Литература

1. *Sotirelis N. P., Chrysikopoulos C. V.* Interaction Between Graphene Oxide Nanoparticles and Quartz Sand // *Environ. Sci. Technol.* 2015. Vol. 49. No. 22. P. 13413–13421.

* Работа выполнена в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов, аспирантов и лиц, имеющих ученую степень, финансируемой Правительством Республики Карелия, и в рамках Госзадания КарНЦ РАН FWME-0222-2019-0065.

2. Садовничий Р. В., Михайлина А. А., Рожкова Н. Н., Инина И. С. Морфологические и структурные особенности кварца шунгитовых пород Максовской залежи // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2016. № 2. С. 73–88.
3. Патент № 2778691 Российская Федерация. Наноразмерный кварц и способ его получения. 23.08.2022. Бюл. № 24 / Рожкова Н. Н., Ригаева Ю. Л., Рожков С. С., Ковальчук А. А.
4. Шарпарь Н. Д., Ковальчук А. А., Горюнов А. С., Екимова Т. А., Рожкова Н. Н. Исследование наноразмерного кварца шунгитовых пород // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 102–113.

ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК СТАНДАРТНОГО И ВОССТАНОВЛЕННОГО ОКСИДА ГРАФЕНА

М. Е. Ильин², А. С. Тойкка^{1, 2}, М. Г. Воробьев³, Н. В. Каманина^{1, 2}

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

³ Институт проблем машиноведения РАН

e-mail: ilin_matwei@mail.ru

Аннотация. В этой работе представлены результаты определения оптических и физических параметров модели стандартного и восстановленного оксида графена (ОГ) с помощью эллипсометрии для дальнейшего использования при создании оптоэлектронных устройств на основе жидких кристаллов (поляризаторов, модуляторов, сенсоров и пр.).

На данный момент оксид графена является крайне перспективным материалом для использования в сфере оптоэлектроники. Его применяют при изготовлении поглощающих элементов, оптических линз, поляризационно-селективных устройств, сенсоров и многого другого [1]. В данной работе определялись основные параметры пленок стандартного и восстановленного ОГ методом центрифугирования. Для их нахождения использовался эллипсометр J. A. Woollam M-2000RCE. Модели стеклянной подложки и пленки задавались формулой Коши.

На рис. 1 представлена модель восстановленного ОГ, подобранная под результаты измерений.

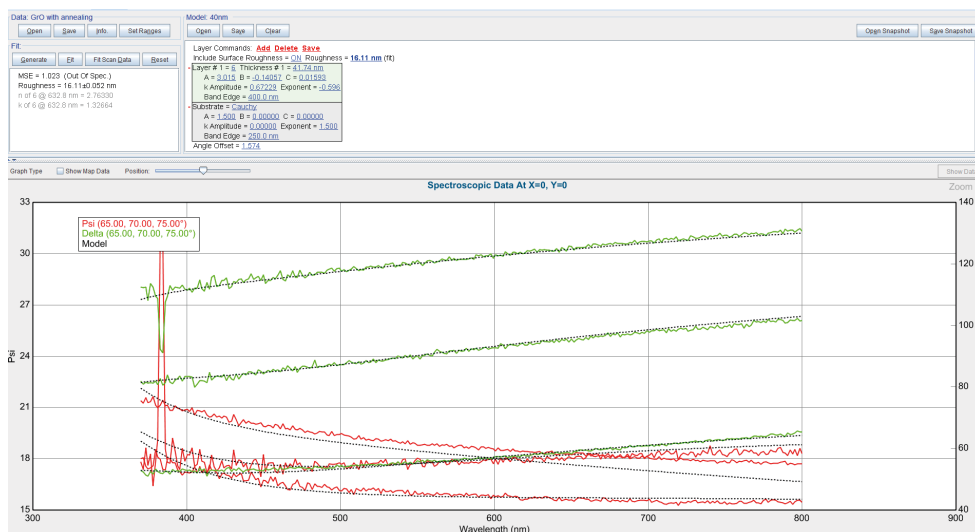


Рис. 1. Параметры модели восстановленного ОГ и зависимости полученных угла отношения скалярных коэффициентов отражения (Psi) с разности фаз (Delta) от длины волны (сплошная — для измеренных значений, пунктир — подобранная модель)

В результате были примерно (порядка нм) оценены толщина и шероховатость пленок стандартного и восстановленного ОГ, найдены зависимости показателя преломления и коэффициента экстинкции в видимом диапазоне, позволяющие более точно определить толщину пленок при помощи спектрофотометрии.

Литература

1. Wu J., Jia L., Zhang Y., Qu Y. et al. Graphene Oxide for Integrated Photonics and Flat Optics // Advanced Materials. 2021. Vol. 33. No. 3. P.2006415.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНТИРАСТВОРИТЕЛЯ, ЙОДОВОДОРОДНОЙ И СОЛЯНОЙ КИСЛОТ НА ФАЗОВУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕОРГАНИЧЕСКОГО ПЕРОВСКИТА CsPbI_3

Ю. Е. Исаев, А. С. Тарасов, А. Э. Дегтерев, И. А. Ламкин, С. А. Тарасов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
e-mail: yura.isaev.97@bk.ru

Аннотация. Перовскит является перспективным материалом для оптоэлектроники и солнечной энергетики. Популярность набирают полностью неорганические перовскиты, которые по сравнению с органо-неорганическими меньше подвержены влиянию термической деградации и имеют более долгий срок службы. На их основе возможно создание эффективных и долговечных солнечных элементов.

Примером такого материала является CsPbI_3 . Однако для данного соединения характерен полиморфизм. Существуют черные перовскитные α -, β -, γ -фазы, применимые в фотовольтаике, и желтая неперовскитная δ -фаза, которая более стабильна при низких температурах, но непригодна для создания солнечных элементов из-за большой ширины запрещенной зоны 2,88 эВ [1]. Поэтому стабилизация перовскитной фазы CsPbI_3 является актуальной задачей.

Добавление кислот в раствор перовскита и использование антирастворителя после нанесения позволяет получить стабильную пленку CsPbI_3 и снизить температуру фазового перехода в перовскитную фазу за счет изменения кристаллической структуры пленки и улучшения растворимости компонентов [2].

В работе было исследовано влияние концентрации кислот и выбора антирастворителя на стабильность перовскитной фазы пленок CsPbI_3 . Исследуемые кислоты являются сильными электролитами. Они способны образовывать промежуточные соединения в растворе, что приводит к улучшению растворимости компонентов и получению более однородной пленки. Рассмотрено влияние технологических параметров, таких как время и температура отжига пленки, наличие предварительного нагрева подложки и отжига пленки с антирастворителем, скорость центрифугирования.

Методом одноэтапного центрифугирования были получены стабильные пленки перовскитной фазы CsPbI_3 . Нанесение происходило на открытом воздухе и при высокой влажности. Экспериментально подтверждено, что при добавлении кислот температура фазового перехода в перовскитную фазу уменьшается.

Для определения оптимальных технологических параметров и концентраций кислот были исследованы спектры фотолюминесценции, пропускания и поглощения созданных пленок. Было установлено, что на открытом воздухе и при высокой влажности особое влияние на качество создаваемой пленки перовскита оказывает предварительный нагрев подложек, а также температура и время отжига нанесенного слоя.

Литература

1. Luo P. et al. Solvent engineering for ambient-air-processed, phase-stable CsPbI_3 in perovskite solar cells // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2016. Vol. 7. No. 18. P. 3603–3608.
2. Haque F. et al. Effects of hydroiodic acid concentration on the properties of CsPbI_3 perovskite solar cells // ACS omega. 2018. Vol. 3. No. 9. P. 11937–11944.

СТРУКТУРА ГРАНИЦ РАЗДЕЛА В СИСТЕМЕ ИТО-ПОЛИМЕР И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК*

Ю. О. Волков^{1, 2}, Б. С. Роцин¹, А. Д. Нуждин¹,
Б. И. Островский^{1, 2}, В. Е. Асадчиков¹

¹ Институт кристаллографии КККиФ, НИЦ «Курчатовский институт»

² Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН
e-mail: volkov.y@crys.ras.ru

Аннотация. Структура границ раздела в системе ИТО-PMDA-FLC жидкокристаллической ячейки изучена методами рентгеновской рефлектометрии и диффузного рентгеновского рассеяния. Получены количественные параметры строения переходных слоев и статистика шероховатостей на скрытых границах раздела.

Жидкокристаллические (ЖК) ячейки, широко используемые в современных дисплеях, представляют собой многослойную структуру, состоящую из электродов — пленок оптически прозрачного полупроводника, полимерных ориентантов и ЖК-слоя, нанесенных на стеклянную подложку. Ранее было показано, что ключевой параметр, определяющий доменную структуру сегнетоэлектрического ЖК-слоя — анизотропия поверхностной энергии — связан с шероховатостью границ раздела в структуре ячейки [1].

В работе был изучен элемент, состоящий из пленки оксида индия-олова (ИТО) на подложке из оптического стекла, ориентирующего полимерного покрытия (PMDA) и смектического сегнетоэлектрического жидкого кристалла (FLC-497). Для исследования внутренней слоевой структуры ЖК-элемента были применены методы рентгеновской рефлектометрии и диффузного рентгеновского рассеяния в геометрии скользящего падения [2], что позволило разделить вклад шероховатостей и переходных слоев в строение скрытых границ раздела. Пленка ИТО была синтезирована методом лазерного импульсного напыления в фабричных условиях, пленка PMDA нанесена методом центрифугирования из раствора. Рентгеновские измерения были проведены на многофункциональном лабораторном дифрактометре ДРШ [3], использовалось излучение с энергией 8048 эВ (длина волны $\lambda \approx 1.5405 \text{ \AA}$). На рис. 1(а) представлены экспериментальные угловые зависимости зеркального рентгеновского отражения от последовательных слоев ЖК-элемента.

* Экспериментальная часть работы выполнена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Теоретическая часть работы выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-12-00200).

Авторы благодарят А. А. Жукович-Гордееву и Е. П. Пожидаева (ФИАН) за предоставленные образцы и многократные обсуждения.

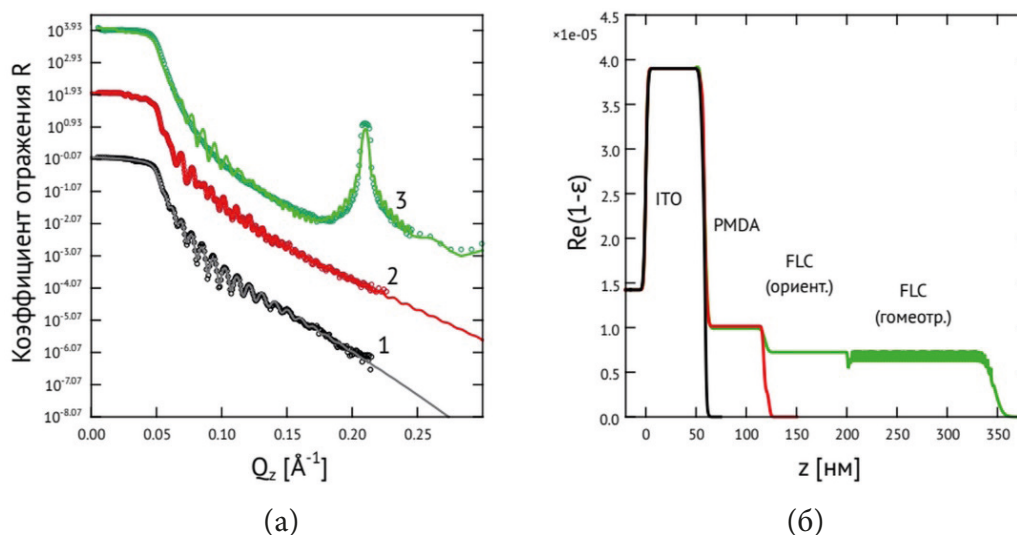


Рис. 1. (а) Экспериментальные кривые отражения от образцов с нанесенными пленками: ITO (1), ITO-PMDA (2) и ITO-PMDA-FLC (3).
(б) Рассчитанные распределения оптической плотности в ЖК-элементе вдоль нормали к поверхности образцов

Рассчитанные распределения оптической плотности (рис. 1(б)) показывают, что реальные толщины и объемные плотности слоев в структуре ЖК-элемента согласуются с оценочными значениями исходя из параметров формирования слоев. В то же время на внешних поверхностях пленок ITO и PMDA присутствуют нарушенные слои пониженной плотности с характерными размерами 5.1 нм и ~6.5 нм; кроме того, в нарушенный слой на поверхности PMDA вносят вклад объемные ростовые неоднородности. Рассчитанные спектры шероховатости (PSD) границ раздела показывают увеличение эффективной высоты шероховатости с 0.9 нм для поверхности подложки до 1.4 нм для поверхности ITO и более 4.6 нм для поверхности PMDA. При этом эффективные коэффициенты кросс-корреляции K_s для границ раздела подложка-ITO и ITO-PMDA составили соответственно $K_s \approx 0.85$ и $K_s \approx 0.28$. Сравнение результатов расчетов для образцов на различных этапах формирования структуры ЖК-элемента показывает, что строение переходных слоев на границах раздела практически не изменяется при последовательном нанесении пленок. Также показано, что в слое смектического сегнетоэлектрического ЖК вследствие наличия свободной границы раздела происходит разделение на ориентированный подложкой планарный слой толщиной 90–120 нм и гомеотропно ориентированный поверхностный подслой, включающий до 40 смектических слоев.

Литература

1. Кузнецов А. В., Жукович-Гордеева А. А., Смирнов Н. А., Пожидаев Е. П. Полидоменная и монодоменная структуры сегнетоэлектрического жидкого кристалла, ограниченного шероховатыми анизотропными пограничными поверхностями // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. № 5. С. 3–13.
2. Kozhevnikov I. V., Peverini L., Ziegler E. Development of a self-consistent free-form approach for studying the three-dimensional morphology of a thin film // Phys. Rev. B. 2012. Vol. 85. P. 125439.
3. Асадчиков В. Е., Бабак В. Г., Бузмаков А. В. и др. Рентгеновский дифрактометр с подвижной системой источник-детектор // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 2. С. 1–9.

СВЯЗАННЫЕ ОРТОГОНАЛЬНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ РЕШЕТКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАКОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. С. Макин^{1, 2}, Р. С. Макин³

¹ Филиал АО «Корпорация “Комета”» — «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения»

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
e-mail: vladimir.s.makin@gmail.com

Аннотация. Предложена и подтверждена экспериментами универсальная модель, объясняющая образование связанных решеток ортогональной ориентации на поверхностях полупроводников под действием серии ультракоротких импульсов поляризованного лазерного излучения.

Значительное количество публикаций посвящено проблеме изучения образования упорядоченных структур разрушения поверхности полупроводников под действием ультракоротких импульсов лазерного излучения (ЛИ). В [1] был сформулирован перечень нерешенных вопросов, а также предложена классификация периодических поверхностных структур (ППС), в частности, по величинам их периодов (d): предполагалось, что к лазерно-индуцированным структурам относятся только субволновые, с $d < \lambda$, где λ — длина волны ЛИ. В экспериментах регулярно наблюдалось образование двух типов структур: $\mathbf{g} \parallel \mathbf{E}$ с $d \leq \lambda$ и $\mathbf{G} \perp \mathbf{E}$ с $D \geq \lambda$, т. е. появлялись и суправолновые ППС, см., например, обзор [2]. Здесь $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля ЛИ.

В настоящей публикации рассмотрено проведение исследования в рамках универсальной поляритонной модели лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред и нелинейной математической модели пространственных периодов образующихся структур. Для объяснения образования суправолновых структур привлекались различные модели, включая интерференцию с участием поверхностных плазмон поляритонов (ППП) TE типа, гидродинамическое перемещение расплава. В настоящей работе на полупроводники распространяется модель, ранее предложенная для металлов и заключающаяся во взаимной интерференции ППП близких (по углу) направлений распространения [3]. Модель предсказывает образование связанных первичных $\mathbf{g}$ и вторичных $\mathbf{G}$ решеток ортогональной ориентации и полностью подтверждается многочисленными экспериментами. Решетки $\mathbf{g}$ и $\mathbf{G}$ имеют квантованные периоды, подчиняющиеся нелинейному порядку Шарковского. Модель образования связанных решеток является универсальной, поскольку справедлива для металлов, полупроводников и диэлектриков.

Литература

1. Bonse J. Quo Vadis LIPSS? — Recent and Future Trends on Laser-Induced Periodic Surface Structures // *Nanomaterials*. 2020. No. 10. P.1950.
2. Nivas J.J.J., Amoruso S. Generation of suprawavelength grooves in femtosecond laser surface structuring of silicon // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. No. 1. P.174.
3. Макин В. С., Макин Р. С. Механизм образования суправолновых микроструктур на поверхностях металлов линейно поляризованным ультракороткоимпульсным лазерным излучением // *Письма в Журнал технической физики*. 2023. Т. 49. № 21. С. 33–37.

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЕШЕТОК АНОМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ НА ДИЭЛЕКТРИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

В. С. Макин^{1, 2}, Р. С. Макин³

¹ Филиал АО «Корпорация «Комета»» — НПЦ ОЭКН

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого —
Институт ядерной энергетики

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
e-mail: makin1946@mail.ru

Аннотация. Предложена и на основе экспериментальных данных подтверждена справедливость модели образования решеточных структур аномальной ориентации на поверхностях диэлектриков под действием УКИ линейно поляризованного лазерного излучения, в рамках универсальной поляритонной модели.

Проблема образования решеток $\mathbf{G}$ аномальной ориентации $\mathbf{G} \perp \mathbf{E}$ на поверхностях конденсированных сред под действием импульсов лазерного излучения (ЛИ) линейной поляризации известна давно. Здесь $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля ЛИ. Ее решение, основанное на модели взаимной интерференции (МВИ) поверхностных плазмон поляритонов, возбуждаемых ультракороткими импульсами (УКИ) ЛИ и распространяющихся в близких по углу направлениях, недавно было предложено для металлов [1] и полупроводников [2, 3]. В настоящей работе на основе анализа опубликованных экспериментальных данных с использованием универсальной поляритонной модели справедливость МВИ, ранее установленной для металлов и полупроводников, расширяется на диэлектрики. Периоды первичных решеток нормальной ориентации ($g \parallel \mathbf{E}$) пропорциональны длине волны ЛИ λ , квантуются; их значения принадлежат последовательности нелинейного порядка Шарковского. Периоды вторичных решеток $\mathbf{G}$ аномальной ориентации также квантуются, принадлежат порядку Шарковского и могут принимать суправолновые значения.

Для диэлектриков модель подтверждается следующими экспериментальными данными, которые в рамках МВИ типичны также для металлов и полупроводников: 1) решетка $\mathbf{g}$ является первичной, решетка $\mathbf{G}$ — вторичной; решетки $\mathbf{g}$ и $\mathbf{G}$ взаимосвязаны; 2) ортогональные решетки $\mathbf{g} \perp \mathbf{G}$ пространственно сосуществуют и взаимодействуют; 3) на начальной стадии образования решетки $\mathbf{G}$ имеют квазипериодический характер; 4) отношение периодов решеток $\mathbf{G}$ и $\mathbf{g}$ $D/d \sim (2-3)$; в ряде случаев решетки $\mathbf{G}$ являются суправолновыми ($D \geq \lambda$); 5) решетки $\mathbf{G}$ наблюдались как для кристаллических, так и для аморфных сред (BaF_2 , CaF_2 , TiO_2 , Nd LGGG , кристаллический кварц и кварцевое стекло и др.). В МВИ рассматривается система двух пространственно перекрывающихся взаимосвязанных ортогональных решеток $\mathbf{g}$ и $\mathbf{G}$. Таким образом, МВИ [1] справедлива не только для металлов и полупроводников, но и для диэлектриков и носит универсальный характер. Использование предложенной модели в технологии лазерной обработки конденсированных сред позволит целенаправленно получать ортогональные решетки с заданными параметрами на конденсированных средах с существенно различными физическими свойствами.

Литература

1. Макин В. С., Макин Р. С. Механизм образования суправолновых микроструктур на поверхностях металлов линейно поляризованным ультракороткоимпульсным лазерным излучением // Письма в Журнал технической физики. 2023. Т. 49. № 21. С. 33–37.

2. *Макин В. С., Макин Р. С. Дискретные решетки аномальной ориентации на поверхности полупроводников под действием ультракороткоимпульсного лазерного излучения // Журнал технической физики [в печати].*
3. *Макин В. С., Макин Р. С. Поляритонная модель образования суправолновых структур аномальной ориентации на полупроводниках под действием лазерного излучения // Сборник научных трудов XIII Международной конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2024. С. 375–376.*

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЙОДНО-ПОЛИВИНИЛСПИРТОВЫХ ПОЛЯРИЗАТОРОВ*

С. В. Лихоманова^{1, 2, 3}, Н. В. Каманина^{1, 3, 4}

¹ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова» / АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»

² ГУАП

³ НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ

⁴ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

e-mail: lsv-87@bk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований поляризационных свойств йодно-поливинилспиртовых поляризаторов, модифицированных углеродными наночастицами (оксид графена, фуллерен C₇₀, одностенные и двустенные углеродные нанотрубки).

В настоящее время пленочные оптические поляризаторы, изготавливаемые на основе поливинилового спирта (ПВС), широко используются в решении поляризационных задач, например, в дисплейных технологиях [1]. Изменение рабочего спектрального диапазона, прочностных характеристик и других параметров поляризаторов достигается благодаря использованию в качестве дихроичного поглощающего агента различных красителей и наночастиц [2].

В продолжение исследований по модификации йодно-поливинилспиртовых поляризаторов [3] в данной работе представлены оптические характеристики ПВС-поляризаторов, в объем которых были внесены углеродные наночастицы — оксид графена, фуллерен C₇₀ и углеродные нанотрубки (одностенные и двустенные УНТ). Концентрация перечисленных углеродных сенситизаторов составляла 0,1 вес. % к массе сухого ПВС.

На рис. 1 представлены полученные значения пропускания параллельной и ортогональной составляющих поляризованного светового потока, проходящего через исследуемые ПВС-йодные поляризаторы.

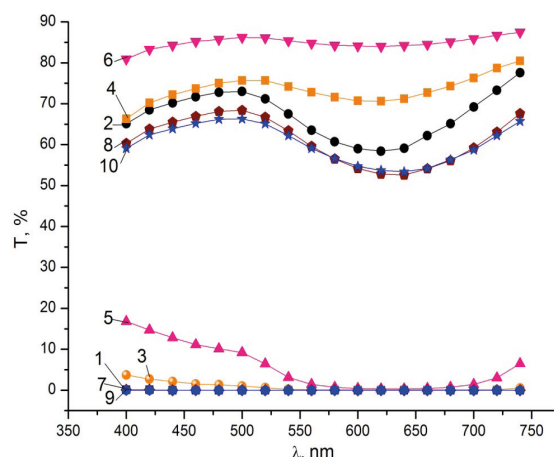


Рис. 1. Спектры пропускания ортогональной (кр. 1, 3, 5, 7, 9) и параллельной (кр. 2, 4, 6, 8, 10) компонент поляризованной световой волны, прошедшей через йодно-поливинилспиртовые поляризаторы: кр. 1, 2 — несенсибилизированный углеродными наночастицами; кр. 3, 4 — сенсибилизированный 0,1 вес. % оксида графена; кр. 5, 6 — сенсибилизированный 0,1 вес. % фуллерена C₇₀; кр. 7, 8 — сенсибилизированный 0,1 вес. % одностенными УНТ; кр. 9, 10 — сенсибилизированный 0,1 вес. % двустенными УНТ

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00021.

Пропускание несенсибилизированной ПВС-матрицы имеет значения, сравнимые с используемыми пленочными поляризаторами. Заметное изменение (рост) в спектрах параллельной составляющей имеют поляризаторы, сенсибилизированные оксидом графена и фуллереном C_{70} . Увеличение пропускания для поляризаторов с C_{70} происходит как для параллельной, так и для ортогональной составляющей светового потока. Оксид графена заметно увеличивает пропускание параллельной компоненты, сохраняя минимальное пропускание ортогональной. Углеродные нанотрубки, как одностенные, так и двустенные, снижают пропускание $T_{\text{пар}}$, и в то же время происходит сдвиг минимума поглощения с 620 нм (для несенсибилизированных поляризаторов и поляризаторов с оксидом графена и фуллереном) до 640 нм.

Таким образом, показано, что малая концентрация углеродных наночастиц приводит к возможности варьирования спектральных характеристик йодно-поливинил-спиртовых поляризаторов.

Литература

1. Tang Y., Zhu G., Li Y. et al. Failure analysis of polarizer of liquid crystal display // J. Fail. Anal. and Preven. 2023. No. 23. P. 2673–2682.
2. Alkabsh A. Modification of Structural, optical, and electrical properties of PVA/PVP blend filled by nanostructured titanium dioxide for optoelectronic applications // ECS J. of Solid state science and technology. 2024. No. 13. P. 093006.
3. Kamanina N., Fedorova L., Likhomanova S., Zubtcova Y., Kuzhakov P. Impact of Carbon-Based Nanoparticles on Polyvinyl Alcohol Polarizer Features: Photonics Applications // Nanomaterials. 2024. No. 14. P. 737.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ ШУНГИТА: ЭКСПЕРИМЕНТЫ И КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ*

Л. О. Федорова^{1, 3}, П. В. Кужаков^{2, 3}, Н. В. Каманина^{1, 2, 3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова —
НИЦ «Курчатовский институт»
e-mail: loresafyoc@gmail.com

Аннотация. В настоящем исследовании представлены результаты изучения свойств поляризационных тонких пленок на основе водного раствора поливинилового спирта (ПВС) при их модификации наночастицами шунгита. Проведено исследование изменения спектров пропускания в видимом и ближнем ИК-диапазонах при варьировании концентрации сенсibiliзирующей добавки, установлены значения микротвердости и смачиваемости поверхности. Экспериментальные результаты подтверждаются квантово-химическим моделированием.

При существующем в современном мире тренде к миниатюризации оптоэлектронных устройств и их компонентов типичные двулучепреломляющие объемные поляризаторы (например, призмы Глана или Николя) теряют свою актуальность на фоне полимерных тонкопленочных. В качестве полимера для таких пленок чаще всего используется поливиниловый спирт [1, 2]. Практическая значимость поляризаторов определяется, во-первых, их поляризационной эффективностью, а во-вторых, их механической прочностью, так как именно невысокие значения прочностных параметров являются основным недостатком тонкопленочных структур.

Для управления характеристиками оптических материалов, а значит, и расширения областей их применения существуют способы их модификации наноструктурами различной природы. Шунгит на данный момент является не самым популярным в мире материалом для оптоэлектроники, однако обладает высоким потенциалом [3], чтобы стать таковым, благодаря своей уникальной наноуглеродной структуре, экологичности и низкой стоимости.

В результате технологического цикла синтеза чистых и сенсibiliзированных наночастицами шунгита пленок ПВС были созданы поляризаторы с различными геометрическими параметрами, которые зависят от степени растяжения. Значение микротвердости было измерено с помощью прибора ПМТ-3М (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург). Для определения поляризационной эффективности в диапазоне длин волн 200–1200 нм использован спектрофотометр СФ-26. Параметры смачиваемости определены с помощью прибора ОСА 14ЕС. Экспериментально установлены увеличение микротвердости и гидрофильности поверхности, а также высокие значения поляризационной эффективности (89–99 % в диапазоне 500–750 нм); пропускание параллельной компоненты света составило ~70–85 % в видимом диапазоне спектра. Квантово-химическое моделирование для качественного анализа корреляции между длиной связи фрагмента ПВС и фрагментов, составляющих шунгит, со значением микротвердости выполнено с помощью программ GaussView5.0, Gaussian 09W.

* Исследование выполнено частично за счет гранта Российского научного фонда № 24-23-00021.

Литература

1. *Fahmy A., Khafagy R. M., Elhaes H., Ibrahim M. A.* Molecular properties of polyvinyl alcohol/sodium alginate composite // *Biointerface Res. Appl. Chem.* 2020. No. 10. P. 4734–4739.
2. *Kamanina N. V., Fedorova L. O., Likhomanova S. V., Zubtcova Y. A., Kuzhakov P. V.* Impact of Carbon-Based Nanoparticles on Polyvinyl Alcohol Polarizer Features: Photonics Applications // *Nanomaterials*. 2024. No. 14(9): P. 737.
3. *Шека Е. Ф., Рожкова Н. Н.* Шунгит — природная кладовая наноразмерного восстановленного оксида графен // *Наносистемы*. 2014. № 1. С. 3–17.

ОСОБЕННОСТИ ГОРМЕЗИСА МИКРООРГАНИЗМОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВУФ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Г. Н. Зверева¹, И. Ю. Кирцидели²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
им. А. А. Новикова

² Ботанический институт им. В. Л. Комарова
e-mail: ybr.ybr.90@inbox.ru

Аннотация. В работе исследовалось стимулирующее действие малых доз ($W < 1$ мДж/см²) вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения ($\lambda = 166\text{--}182$ нм) на микроскопические грибы различных видов. Обнаружено, что наличие меланина и отсутствие продуктов разложения воды увеличивает стимуляцию колонеобразования микроорганизмов.

Известно, что облучение микроскопических грибов малыми дозами ионизирующего или ВУФ-излучения может приводить к стимуляции их жизнедеятельности [1, 2].

В ходе работы было показано, что:

- ВУФ-облучение в малых дозах приводит к стимуляции колонеобразования микроорганизмов (рис. 1);
- стимуляция более выражена у содержащих меланин микроорганизмов (*Cladosporium*, *Exophiala*), что может быть объяснено образованием хиноидных радикалов при фоторазложении меланина;
- продукты ВУФ-разложения воды снижают стимулирующий эффект;
- кривые вероятности выживания в области стимуляции имеют несколько пиков, что свидетельствует о конкуренции процессов стимуляции и инактивации;
- стимулирующее действие ВУФ-излучения имеет общие особенности с действием ионизирующего излучения.

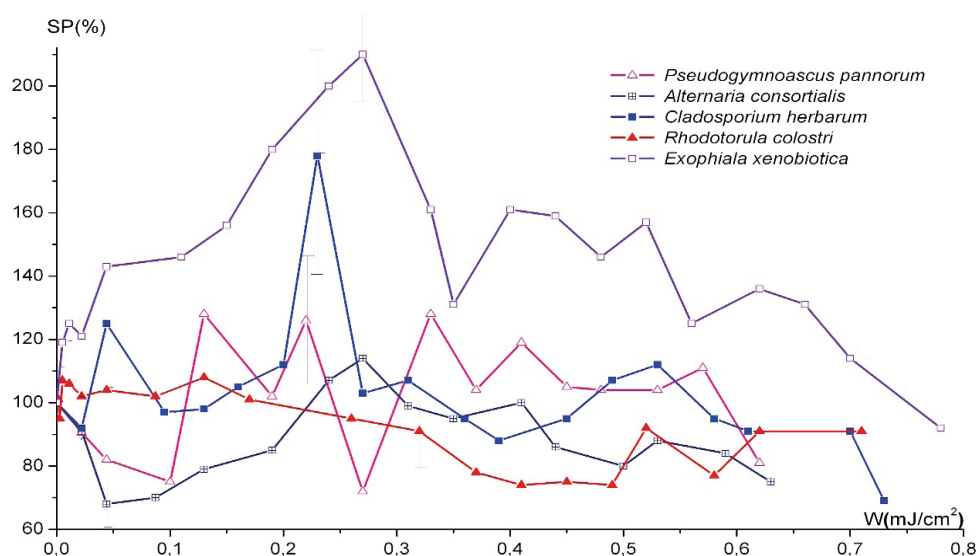


Рис. 1. Зависимость вероятности выживания (SP) от дозы облучения W

Литература

1. Кузин А. М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М.: Наука, 1995. 158 с.
2. Zvereva G. N., Kirtsideli I. Yu. Hormesis in microorganisms under the action of VUV radiation // Proc. SPIE. 2023. Vol. 12920. P. 129200Y. doi: 10.1117/12.3009469

ВЫБОР СПЕКТРА ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ В ФИТОТРОНЕ

Е. Н. Гусенников, С. И. Юран

Удмуртский государственный аграрный университет
e-mail: ujhuf99@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлен обзор и сравнительный анализ спектральных диапазонов и способов их получения в контексте выращивания растений в камере фитотрона.

Освещение играет ключевую роль в процессе фотосинтеза, который является основой роста и развития растений. Спектральный состав излучения непосредственно влияет на интенсивность фотосинтеза, морфологическое развитие и биохимические процессы растений. Целью данной работы является обоснование выбора способа облучения растений для разрабатываемого «Бытового фитотрона» [1]. На рис. 1 представлен один из вариантов внешнего вида бытового фитотрона.



Рис. 1. Внешний вид «Бытового фитотрона»

Различные длины волн светового спектра по-разному влияют на растения. Синий свет (450–495 нм) стимулирует рост вегетативных органов (листья, стебли), влияет на фотосинтез и развитие корневой системы. Красный свет (620–750 нм) способствует цветению и развитию плодов. Он активизирует фотосинтез, но преимущественно влияет на регуляцию цветочных процессов и на длину стебля. Зеленый свет (495–570 нм) в меньшей степени используется растениями для фотосинтеза. Ультрафиолет (280–400 нм) и инфракрасное излучение (700–800 нм) могут влиять на метаболические процессы, такие как синтез пигментов и стимуляция роста.

На данный момент наиболее экономичным и гибким решением для облучения растений является светодиодные фитосветильники. По спектру излучения светодиодных групп выделяют красно-синий и полный спектры. Красно-синий спектр влияет на вегетативный период жизни растений, активизирует прорастание семян, стимулирует рост корневой системы, поддерживает цветение и формирование завязей. Полный спектр подходит для выращивания растений в закрытом грунте на всех стадиях жизни, так как позволяет заменить солнце. Трехцветные комбинации включают красный, синий и небольшой процент зеленого света, позволяющие гибко настраивать амплитуды спектра. В результате чего имеется возможность выставления амплитуд в соответствии с красно-синим и полным спектрами.

В рамках разработки «Бытового фитотрона» трёхцветная комбинация позволяет проводить эксперименты связанные с исследованием влияния различного спектра на рост растений.

Литература

1. Гусенников Е. Н., Юран С. И. Концепт комбинированного устройства контролируемого выращивания растений для бытового применения // Современные тенденции технологического развития АПК. Материалы Международной научно-практической конференции. Ижевск: УдГАУ, 2024. С. 253–256.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ ИК-СПЕКТРОВ ДРЕВЕСИНЫ С ПОМОЩЬЮ ФУНКЦИИ ГАУССА

*Н. С. Камалова, Т. Л. Майорова, Н. Н. Матвеев, Н. Ю. Евсикова,
В. И. Лисицын, С. В. Внукова*

Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г. Ф. Морозова
e-mail: mtl084@yandex.ru

Аннотация. В докладе предлагается анализ изменения профиля полосы поглощения, соответствующей колебаниям в молекуле диоксида углерода в порах древесины березы при увеличении ее влажности до предела гигроскопичности, методом моделирования с помощью функции Гаусса. Результатом проведенных исследований является наглядная демонстрация возможностей вычислительного эксперимента при решении задачи детализации изменений ИК-спектрограмм.

Исследование пористых гетероструктур природного происхождения сопряжено с рядом трудностей, связанных с их многокомпонентностью, сложным составом, анизотропией и неупорядоченностью надмолекулярной матрицы. Одним из способов непосредственного наблюдения за изменением их микроструктуры является ИК-спектроскопия [1, 2]. Однако анализ спектрограмм требует разработки методов анализа с использованием формализованного моделирования профиля полос поглощения, поскольку, несмотря на существующую достаточно обширную базу математических способов распознавания, профили полос претерпевают существенные изменения в зависимости от состава гетероструктуры и условий ее формирования [3–5].

Предлагается моделировать профиль полосы поглощения с помощью функции Гаусса для детализации изменений ИК-спектрограмм при увеличении влажности в порах гетероструктуры до предела гигроскопичности. Концепция основывается на том факте, что в таком сложном объекте, как гетероструктура природного происхождения, колебания в межмолекулярных связях из-за наличия самоорганизующихся матриц носят комплексный характер. Поэтому полосы поглощения кроме основной частоты (или волнового вектора) характеризуются некоторой дисперсией, а выводы об изменениях микроструктуры биокomпозитов при воздействии внешних факторов и изменении их состава основываются на анализе таких спектральных характеристик, как положение максимума полосы (k_0), ее полуширина (σ) и интенсивность (или амплитуда I_i). Для выявления наиболее общих изменений, вызванных увеличением влажности до предела гигроскопичности в порах древесины, в работе исследуется изменение профиля «двугорбой» полосы поглощения $2300\text{--}2400\text{ см}^{-1}$, соответствующей основным колебаниям диоксида углерода CO_2 . Профиль полосы моделировался тремя функциями Гаусса, формула (1):

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{I_1 \exp\left(-\left((k - k_1)^2 / 2\sigma_1^2\right)\right) + I_2 \exp\left(-\left((k - k_2)^2 / 2\sigma_2^2\right)\right) - I_3 \exp\left(-\left((k - k_3)^2 / 2\sigma_3^2\right)\right)}{I_{\max}}, \quad (1)$$

где параметры I_1 , k_1 , σ_1 , I_2 , k_2 , σ_2 — интенсивность и положение в максимуме элементарной полосы и ее полуширина соответственно, I_3 — интенсивность поглощения в области волнового вектора k_3 , с полушириной σ_3 .

В компьютерной модели анализировалась относительная интенсивность $\frac{I}{I_{\max}}$ в выбранном участке спектра для детализации изменений профиля полосы. Параметры модели определялись с помощью критерия эффективности Нэша — Сатклиффа (МЕ) для сухой древесины березы и после достижения гигроскопичности. В результате

вычислительного эксперимента критерий достиг максимальной величины $ME = 0,97-0,98$, что соответствует высокому уровню адекватности модели при однозначно определяемых параметрах Гауссовых кривых.

В результате детализованный анализ изменения профиля полосы выявил тот факт, что при существенном уменьшении интенсивности полосы поглощения, соответствующей основным колебаниям в молекуле диоксида углерода CO_2 , происходит увеличение (практически в два раза) полуширины первого максимума и перераспределение интенсивности между двумя соседними максимумами, а именно уменьшение вклада в интегральную интенсивность колебаний с волновым вектором k_2 и увеличение вклада колебаний с волновым вектором k_1 . При этом положение полосы в целом не изменилось. Таким образом, использование формализованного моделирования с помощью функции Гаусса позволяет детализировать влияние влажности гетероструктуры на перераспределение энергии колебаний в молекулах диоксида углерода.

Литература

1. Камалова Н. С., Постников В. В. Физические основы модифицирования древесины: монография. Министерство науки и высшего образования РФ. ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Воронеж, 2019. 164 с.
2. Матвеев Н. Н., Камалова Н. С., Евсикова Н. Ю. Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах и биокomпозиционных материалах в неоднородном температурном поле: монография. Министерство науки и высшего образования РФ. ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». Воронеж, 2021. 316 с.
3. Popescu M.-C., Popescu C.-M., Lisa G., Sakata Y. Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods // Journal of Molecular Structure. 2011. March. P. 1–8.
4. Sugii Sh., Fujimoto T., Tsutsumi H., Inagaki T., Tsuchikawa S. Dynamic behavior of wood chemical components under drying process measured by near infrared spectroscopy // Journal of Near Infrared Spectroscopy. 2017. September. P. 1–7.
5. Watanabe A., Morita S., Ozaki Y. Temperature-dependent structural changes in hydrogen bonds in microcrystalline cellulose studied by infrared and nearinfrared spectroscopy with perturbation-correlation moving-window two-dimensional correlation analysis // Appl Spectrosc. 2006. Vol. 60. P. 611.

ВРЕМЯ-РАЗРЕШЕННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА И ТРИПЛЕТОВ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРА ХЛОРИНА Е6 В ПРИСУТСТВИИ АЛЬБУМИНА

*Д. М. Бельтюкова¹, В. П. Белик¹, К. А. Чудаков², О. В. Смирнов¹,
И. В. Семенова¹, О. С. Васютинский¹*

¹ ФТИ им. А. Ф. Иоффе

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
e-mail: Dina.Beltukova@mail.ioffe.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследований фотофизических свойств молекул фотосенсибилизатора хлорина е6 и эффективности генерации синглетного кислорода в растворах, содержащих альбумин. Обнаружено, что в комплексах хлорин е6 — альбумин эффективность реакции триплетов хлорина е6 с кислородом существенно понижена, что позволило впервые зарегистрировать фосфоресценцию триплетного состояния хлорина е6 при комнатной температуре.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) широко применяется в медицинской практике для лечения онкологических заболеваний, однако физико-химические процессы, лежащие в ее основе, изучены явно недостаточно. Известно, что эффективность ФДТ может быть обусловлена двумя типами фотохимических реакций, возникающих при возбуждении молекул фотосенсибилизатора светом: реакции типа I, приводящие к генерации таких активных форм кислорода, и реакции типа II, приводящие к генерации синглетного кислорода (СК) [1]. Конкретные механизмы, происходящие в живых клетках при ФДТ, до настоящего времени не вполне понятны. Известно, что при попадании в организм фотосенсибилизаторов хлоринового ряда они могут образовывать комплексы с различными белками, в том числе с главным транспортным белком крови — альбумином.

В данной работе методом время-разрешенной спектроскопии единичных фотонов была исследована эффективность генерации СК в растворах фотосенсибилизатора хлорина е6, содержащих альбумин HSA. Как видно из рис. 1(а), при увеличении концентрации HSA происходило существенное падение интенсивности сигнала фосфоресценции СК, которое сопровождалось увеличением времени генерации и деградации СК. Причем, при полном связывании молекул хлорина е6 с HSA генерация СК не наблюдалась, что позволило нам зарегистрировать слабый сигнал фосфоресценции из триплетного состояния молекул хлорина е6 со временем жизни 330 ± 40 мкс, представленный на рис. 1(б). В результате был сделан вывод, что в связанном состоянии хлорин е6 не генерирует СК, а также была установлена энергия нижнего триплетного состояния молекулы хлорина е6.

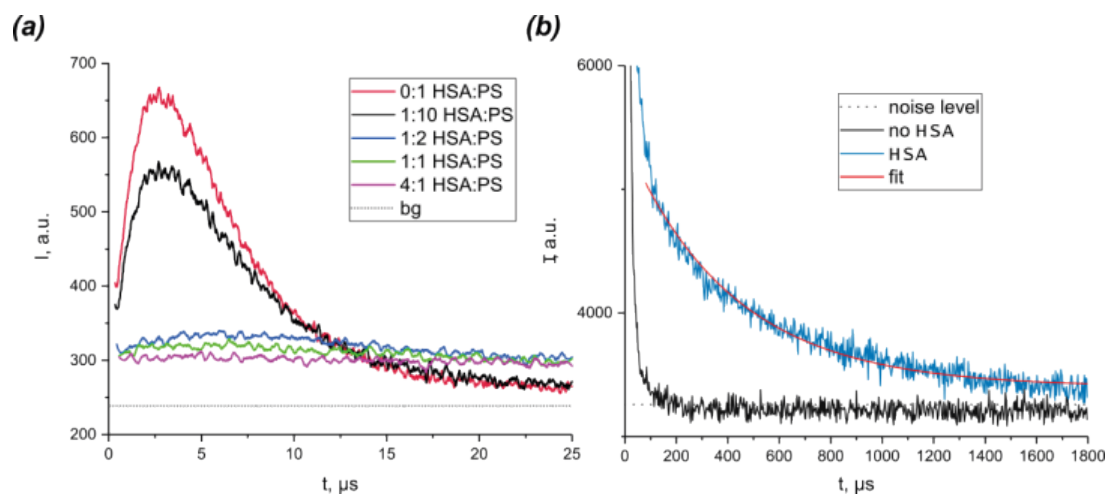


Рис. 1. Время-разрешенный сигнал флуоресценции: (а) СК в зависимости от концентрации альбумина ($\lambda = 1274 \pm 3$ нм); (б) триплетного состояния хлорофилла a_6 ($\lambda = 1050 \pm 3$ нм)

Литература

1. Foote C.S. Definition of type I and type II photosensitized oxidation // Photochemistry and Photobiology. 1991. No. 54. P.659.

РЕЗОНАТОР ФАБРИ-ПЕРО С ФОТОУПРАВЛЯЕМЫМ ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИМ ДЕФЕКТНЫМ СЛОЕМ*

М. Н. Крахалев^{1, 2}, А. С. Абдуллаев¹, А. С. Зувев^{1, 2}, В. А. Гуняков¹,
В. Я. Зырянов¹, И. В. Тимофеев^{1, 2}

¹ Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН —
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

² Институт инженерной физики и радиоэлектроники
Сибирского федерального университета
e-mail: kmn@iph.krasn.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования спектрального положения мод резонатора Фабри-Перо с фотоуправляемым холестерическим дефектным слоем. Закрутка холестерика контролировалась облучением образца УФ и синим светом. Показано, что, изменяя угол закрутки структуры холестерика, можно с одинаковой эффективностью управлять обоими типами мод резонатора.

Использование жидкого кристалла (ЖК) в качестве резонаторного (дефектного) слоя позволяет реализовать эффективное управление электрическим полем, спектральным положением или поляризацией резонансных мод. Вследствие анизотропии показателя преломления ЖК в резонаторе реализуется два набора мод, при этом электрическое поле позволяет эффективно управлять только одним набором резонансов (*re*-моды), второй набор мод (*ro*-моды) практически не чувствителен к изменению ориентационной структуры ЖК. В данной работе предложено использовать в качестве дефектного слоя резонатора Фабри-Перо холестерик с фотоуправляемым углом закрутки структуры [1]. Экспериментально и теоретически показано, что при увеличении угла закрутки структуры *re*-моды испытывают красный спектральный сдвиг, в то время как *ro*-моды смещаются в синюю область спектра (рис. 1). Величина смещения мод зависит от угла закрутки структуры.

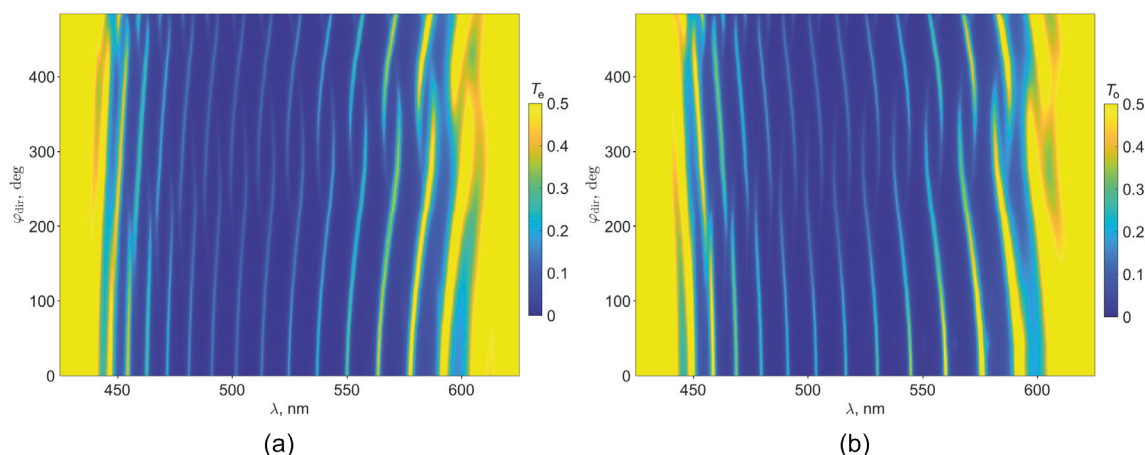


Рис. 1. Измеренные спектры пропускания резонатора с хиральным нематиком в качестве дефектного слоя для *re*-мод (a) и *ro*-мод (b)

Литература

1. Abdullaev A.S., Krakhalev M.N., Zyryanov V.Ya. Photoinduced transformation of the orientational structure of a chiral nematic under planar-conical anchoring // Liq. Cryst. Their Appl. 2024. No. 24. P.90–95 (in Russ.).

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-12-00236.

ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО И НАТУРАЛЬНОГО УЛЬТРАМАРИНА МЕТОДАМИ ИК И РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

И. И. Андреев^{1, 2}, О. А. Смолянская¹, С. В. Сирро^{1, 2}

¹ Университет ИТМО

² Государственный Русский музей

e-mail: iiandreev@itmo.ru

Аннотация. В этой работе представлен пример решения проблемы определения синтетического и натурального ультрамарина на основе спектральных данных среднего инфракрасного диапазона, рамановской спектроскопии, а также математических методов их обработки.

Краски на основе натурального ультрамарина известны со времен Античности и всегда высоко ценились художниками за уникальный синий цвет, что непосредственно отражалось на цене. С 1828 г. началось промышленное изготовление синтетического ультрамарина, и он стал доступен широкому кругу живописцев. Установление происхождения ультрамарина позволяет определить поздние, не задокументированные реставрации и, что самое главное, выявить фальсификации, выполненные с использованием анахроничных красителей.

Инфракрасная и рамановская спектроскопия с математическими методами анализа данных является современным подходом, который позволяет использовать неинвазивные методики, чтобы избежать этапа подготовки образца, и подходит для классификации многокомпонентных объектов. Этот подход показал многообещающие результаты в различных областях, например, как неразрушающий метод обнаружения подделок [1].

В этом исследовании мы сообщаем о результатах классификации различных красителей на основе их ИК и рамановских спектров, измеренных на 14 образцах ультрамариновых пигментов (9 натуральных и 5 синтетических). Для каждой краски было подготовлено по три репликата с различными связующими: цельное яйцо, желток и льняное масло. Были получены спектры и с реальных объектов в широком временном диапазоне (XI–XXI в.). Результаты МГК и других методов многомерного спектрального анализа данных показывают, что предложенный подход позволяет классифицировать краски по связующему веществу и происхождению ультрамаринового пигмента.

Литература

1. Gonzalez-Cabrera M., Arjonilla P., Domínguez-Vidal A., Ayora-Canada M. J. Natural or synthetic? Simultaneous Raman/luminescence hyperspectral microimaging for the fast distinction of ultramarine pigments // *Dyes and Pigments*. 2020. Vol. 178. ISSN 0143-7208.

ТЕРАГЕРЦОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ХУДОЖЕСТВЕННЫХ ПИГМЕНТОВ*

О. А. Смолянская¹, И. И. Андреев^{1, 2}, А. А. Баранова¹

¹ Университет ИТМО

² Государственный Русский музей

e-mail: smolyanskaya@itmo.ru

Аннотация. В данной работе вычислительные методы, в основе которых лежит теория функционала плотности, были использованы для рассмотрения и обоснования особенностей ТГц-спектров поглощения кристаллического материала художественного пигмента. В ходе исследования апробирован метод моделирования спектров поглощения — статический метод на основе традиционного метода DFT, в котором метод DFT используется для расчета электронной структуры. Результаты расчетов спектров поглощения ТГц-диапазона частот кристаллического пигмента кадмия желтого сравнивались с экспериментальными результатами для интерпретации особенностей реальных спектров поглощения и сопоставления их с особенностями структуры веществ и с процессами внутримолекулярного движения.

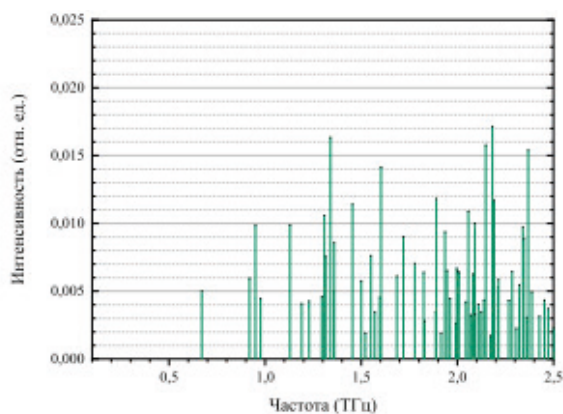
Возможность теоретического анализа динамики межатомных взаимодействий методом DFT является объектом интереса с точки зрения колебательной спектроскопии инфракрасного и терагерцового диапазонов. Возможность расчета нормальных колебательных мод дает возможность проводить теоретический анализ сложных структур и приводить в соответствие отдельным особенностям терагерцовых спектров определенные процессы, связанные с внутри- и межмолекулярными взаимодействиями в веществах. Область, в которой на данный момент проводятся совместные исследования с использованием DFT и терагерцовой спектроскопии, включает множество направлений — от изучения механизмов действия лекарственных препаратов в фармацевтике [1] до прогнозирования спектральных свойств новых материалов терагерцовой фотоники [2].

В настоящей работе оптимизация структур кубического и гексагонального художественного пигмента кадмия желтого проводилась при неизменных параметрах симметрии начальных приближений. В ходе вычислений оптимизированных по энергии структур кубической и гексагональной конфигураций кристалла CdS получены новые структуры, соответствующие исходным симметриям, но с другими, относительно начального приближения, координатами ядер кадмия и серы в решетке. Результаты расчета колебательного спектра статическим методом анализа в приближении гармонического потенциала представлены на рис. 1. Обе структуры содержат достаточно большое количество колебательных мод в диапазоне 0,5–2,5 ТГц. Колебательные моды кубической решетки расположены плотнее в частотной области, чем колебательные моды гексагональной решетки.

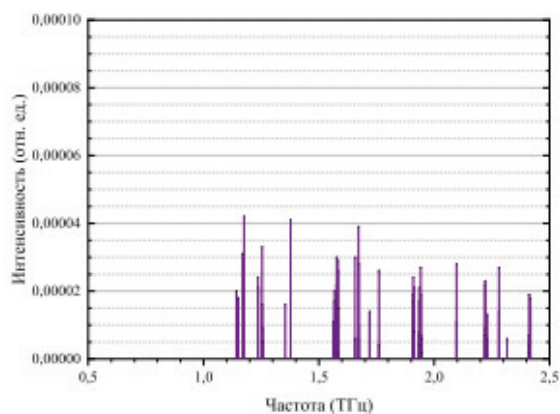
Смоделированные кристаллические решетки имеют примерно одинаковые объемы элементарных ячеек и незначительно различающееся число ядер (суммарно 64 ядра кадмия и серы в ячейке кубической симметрии, 72 ядра в ячейке гексагональной симметрии). При этом пространственное расположение ядер и, соответственно, пространственное распределение зарядов по ячейкам различны, что приводит к различию суммарных дипольных моментов обеих структур. В результате этого возникла сильная разница между интенсивностями колебательных мод кубического и гексагонального соединений CdS.

Из-за полученных малых по сравнению с интенсивностями колебаний кубической решетки (порядка 10^{-5} отн. ед.) интенсивностей решетки гексагональной (порядка

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (Паспорт № 2019-0903).



а)



б)

Рис. 1. Колебательные спектры в диапазоне частот 0,1–2,5 ТГц кубической (а) и гексагональной (б) решеток кристалла кадмия желтого в приближении гармонического потенциала

10^{-2} отн. ед.) можно предположить, что структура реального пигмента желтого кадмия содержит достаточно большое количество соединения CdS кубической симметрии.

Результаты ТГц-эксперимента, проведенного на спектрометре TeraPulse-4000, — коэффициенты поглощения пигмента желтого кадмия в диапазоне 0,1–2,5 ТГц, представлены на рис. 2. Структура спектра кадмия желтого имеет выраженный линейчатый характер благодаря сильным ионным связям в периодической решетке кристалла. Наблюдается достаточно большое число спектральных линий. Рост коэффициента поглощения начинается на частоте 1,7 ТГц, на которой значение коэффициента достигает приблизительно 75 см^{-1} . Следующая область в рассматриваемом диапазоне, где наблюдается рост коэффициента поглощения, начинается на частоте 2,2 ТГц — здесь присутствуют шесть мод высокой интенсивности. Максимальный коэффициент поглощения в диапазоне от 2,2 до 2,5 ТГц составляет около 80 см^{-1} .

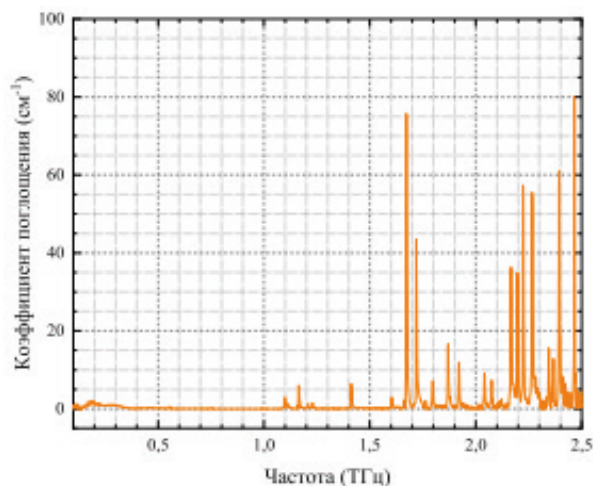


Рис. 2. Коэффициент поглощения в диапазоне частот 0,1–2,5 ТГц пигмента желтого кадмия

Литература

1. Siegel P.H. Terahertz technology in biology and medicine // IEEE transactions on microwave theory and techniques. 2004. Vol. 52. No. 10. P.2438–2447.
2. Kim J. et al. Solid-State Molecular Motions in Organic THz Generators // Advanced Optical Materials. 2021. Vol. 9. No. 4. P.2001521.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ СИСТЕМЫ ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ — НАНОТРУБКИ WS₂, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА ПРОЦЕСС ПОГЛОЩЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ

С. А. Корягин^{1, 2}, Н. В. Каманина^{1, 2, 3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова — НИЦ «Курчатовский институт»

³ АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: sergey2000art@gmail.com

Аннотация. В данной работе исследованы спектральные характеристики структур на основе жидких кристаллов (ЖК) и дисульфида вольфрама (WS₂), изготовленных с различным содержанием нанобъектов WS₂: 0.05, 0.1 и 0.3 wt. %. Основное внимание уделено анализу спектров пропускания и выявлению экситонных пиков, а также изучению возможностей оптического ограничения, что представляет значительный интерес для создания новых фотонных устройств.

Экспериментально было установлено, что структуры ЖК+WS₂ демонстрируют выраженные экситонные пики поглощения на длинах волн около 520 нм и 630 нм, которые связаны с экситонными переходами А и В [1], характерными для WS₂ нанотрубок. Эти пики, как нами установлено, не нивелированы в ЖК-матрице, что подтверждает сильное взаимодействие света с веществом, приводящее к образованию экситон-поляритонов, которые возникают благодаря спин-орбитальному расщеплению в структуре зонного спектра WS₂. Экситонные пики в спектрах поглощения свидетельствуют о высоком уровне поглощения и усилении нелинейных оптических эффектов, что открывает возможности для управления световыми потоками и применения структур ЖК+WS₂ в устройствах оптического ограничения.

Наличие экситон-поляритонов, характерное для таких структур, указывает на их потенциал в создании квазичастиц, способных к эффективному взаимодействию со светом на субволновых масштабах [2]. В связи с этим ЖК+WS₂ структуры могут быть использованы для разработки оптических ограничителей и фотонных устройств, чувствительных к длинам волн в видимой и ближней ИК-областях. Обнаруженные особенности экситонных переходов позволяют рассматривать эти структуры как перспективные компоненты для нанофотоники и оптоэлектроники, где критически важны устойчивое поглощение и управляемость нелинейными оптическими характеристиками.

Литература

1. *Yadgarov L., Višić B., Tenne R.* Strong light-matter interaction in tungsten disulfide nanotubes // *Phys.Chem. ChemPhys.* 2018. Vol. 20. P.20812.
2. *Visic B., Panchakarla L.S., Tenne R.* Inorganic nanotubes and fullerene-like nanoparticles at the crossroads between solid-state chemistry and nanotechnology // *Journal of the American Chemical Society.* 2017. Vol. 139. No. 37. P. 12865–12878.

ФОТОННАЯ СТРУКТУРА С ДВУМЕРНЫМ УПОРЯДОЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ХИРАЛЬНОГО НЕМАТИЧЕСКОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА*

П. В. Долганов, Н. А. Спириденко, К. Д. Бакланова, В. К. Долганов

Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН
e-mail: pauldol@issp.ac.ru

Аннотация. В работе описываются оптические характеристики упорядоченной двумерной структуры, образованной холестерическим жидким кристаллом с фотонной зоной в видимой области спектра. Обсуждаются уникальные фотонные свойства структуры, способы их перестройки.

Хиральные жидкие кристаллы образуют большое число упорядоченных структур с нетривиальными оптическими свойствами, перспективных для практических приложений. Недавно нами продемонстрирована возможность получения двумерной структуры на основе холестерического (хирального нематического) жидкокристаллического фотонного кристалла с фотонной запрещенной зоной в видимой области спектра [1]. Двумерная структура получена нами в плоских оптических ячейках толщиной от 20 до 50 мкм вблизи температуры перехода холестерика в изотропную фазу. При охлаждении она может сохраняться в широком температурном интервале. Период структуры в плоскости образца составляет несколько десятков микрон, что примерно на два порядка превышает период использованного холестерика. Детально изучены оптические и спектральные свойства структур на основе различных жидкокристаллических материалов и холестерика с различным положением фотонной запрещенной зоны [2].

На рис. 1 приведены фотографии в отраженном и проходящем свете структуры, полученной на основе холестерика с периодом около 350 нм и запрещенной фотонной зоной в области 570 нм.

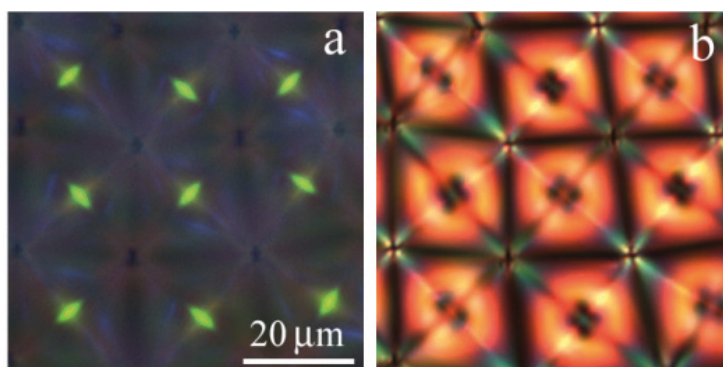


Рис. 1. Фотографии участка упорядоченной двумерной структуры в отраженном (а) и проходящем (б) свете. Поляризаторы скрещены, толщина образца — 20 мкм

Обнаружено, что поляризационные характеристики проходящего через образец света существенно отличаются в различных участках двумерной элементарной ячейки. Нетривиальные оптические свойства можно связать с селективным отражением и вращением плоскости поляризации света. Уникальные свойства структуры могут быть использованы для создания устройств управления световым излучением.

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 23-12-00200.

Литература

1. *Dolganov P. V., Baklanova K. D., Dolganov V. K.* Peculiarities of focal conic structure formed near the cholesteric-isotropic phase transition // *Phys. Rev. E*. 2022. No. 106. P. 014703.
2. *Dolganov P. V., Baklanova K. D., Dolganov V. K., Kats E. I.* Photonics of two-dimensional structures formed by cholesteric liquid crystals // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2024. (Принято к публикации).

УПРАВЛЕНИЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ С МАГНИТНЫМИ НАНОЧАСТИЦАМИ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ПРИКЛАДЫВАЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ

А. А. Тягунов^{1, 2}, Я. В. Барнаш^{1, 2, 3}, Н. В. Каманина^{1, 2, 3}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

² АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова» / АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»

³ НИЦ «Курчатовский институт» — ПИАФ

e-mail: 2001.Alexander.24@mail.ru

Аннотация. В данном исследовании представлены результаты изучения процесса влияния формы электрического импульса на временные параметры системы: жидкий кристалл 5СВ-наночастицы CoFe_2O_4 , обладающей собственной намагниченностью за счет присутствия в составе двух металлических атомов, что существенно влияет на гашение приложенного внешнего электрического поля.

В настоящий момент перспективным методом улучшения динамических характеристик жидкокристаллических (ЖК) ячеек является сенсбилизация: введение в ЖК различных наночастиц, влияющих на изменение поляризации среды [1] и на другие базовые свойства ЖК-мезофазы. Установлено, что введение наночастиц способствует снижению времени включения и выключения ЖК-ячейки. Например, ячейка с чистым 4'-Pentyl-4-biphenyl-carbonitrile (Sigma-Aldrich) при определенных условиях может иметь время включения 6–8 мс. ЖК-ячейка, в которую дополнительно была введена наночастица CoFe_2O_4 , в тех же условиях (управление прямоугольным импульсом питания) способна включаться уже за 2–3 мс [2]. Было замечено, что в данном случае металл в составе наночастицы способствует намагниченности мезофазы, следовательно, возникает дополнительное гашение прикладываемого внешнего поля. Таким образом, встала задача варьирования формы импульса питания, что должно благоприятно сказаться на временных характеристиках ЖК-ячейки. В связи с этим в данной работе проведен подбор параметров и формы прикладываемого управляющего напряжения питания, при которых конкретная система ЖК — частица CoFe_2O_4 имеет наилучшие динамические характеристики.

Установка для исследования представляет собой схему Фридерикса (рис. 1). Поляризованное лазерное излучение проходит через ЖК-ячейку и поляризатор. Затем промоделированное излучение попадает на фотодиод, работающий в фотодиодном режиме, тем самым преобразуется в электрический сигнал, который наблюдается на осциллографе.

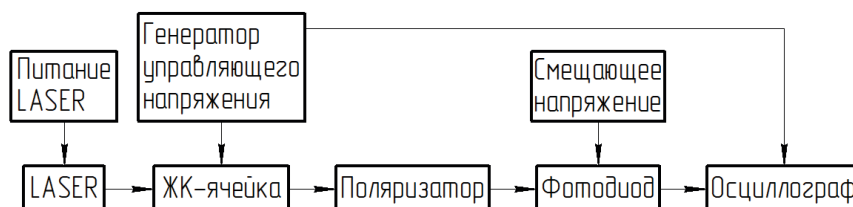


Рис. 1. Схема Фридерикса

Установка настроена таким образом, что при отсутствии управляющего напряжения на ЖК-ячейке фотодиод не фиксирует сигнал. Таким образом, при любом повороте плоскости поляризации ЖК-ячейкой, что происходит под действием управляющего напряжения, сигнал появляется.

Была исследована система 5CB + 0.1 wt. % CoFe_2O_4 . Сборка: S-конфигурация. Толщина слоя: $d = 10$ мкм.

Исследована зависимость сигнала от формы управляющего напряжения. Результаты данного исследования приведены на рис. 2.

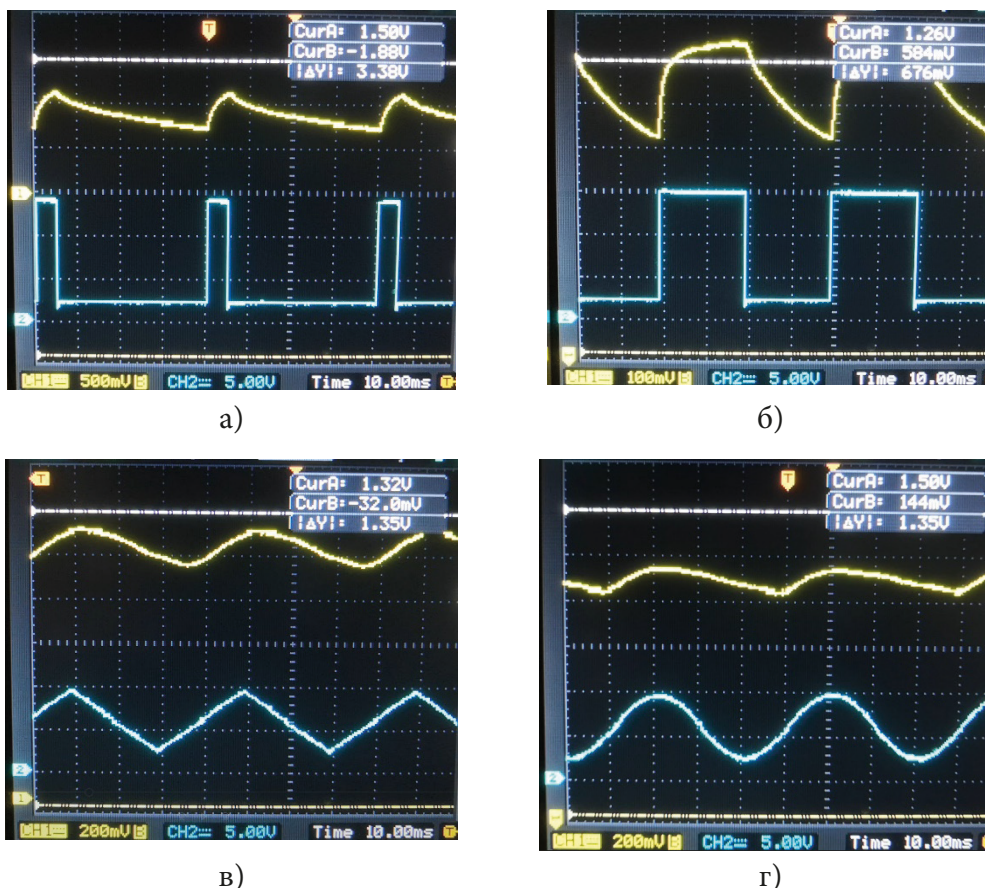


Рис. 2. Осциллограммы оптических откликов при 25 Гц:

- а) прямоугольный импульс (длительность импульса 5 мс); б) прямоугольный сигнал;
в) треугольный сигнал; г) синусоидальный сигнал

Наилучшие данные по быстродействию получены при прямоугольном импульсе: время включения около 1–2 мс.

Литература

1. Каманина Н. В. Фуллеренсодержащие диспергированные нематические жидкокристаллические структуры: динамические характеристики и процессы самоорганизации // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 4. С. 445–454.
2. Каманина Н. В., Тойка А. С., Барнаш Я. В., Редька Д. Н., Лихоманова С. В., Зубцова Ю. А., Кужаков П. В., Jovanovic Z., Jovanovic S. Особенности функционирования жидкокристаллических ячеек с введенными наночастицами CoFe_2O_4 // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2022. Т. 22. № 4. С. 83–91.

Секция 7

ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ В КРИСТАЛЛАХ RTP Z-РОСТА

В. А. Русов, А. А. Мирзаева, М. В. Нежевясов, В. Э. Якобсон, С. Б. Еронько

АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: tashmaxpaka@gmail.com

Аннотация. Анализируется негативный нелинейный эффект при генерации второй гармоники в электрооптических затворах на кристаллах RTP, выращенных на затравку, ориентированную по оси Z, а также рассеяние кристаллами затвора излучения с длиной волны 532 нм.

Кристаллы RTP (титанилфосфат рубидия RbTiOPO_4) [1] чаще применяются в мощных системах, чем КТР (титанилфосфат калия KTiOPO_4), поскольку влияние нелинейных процессов на функциональные характеристики в кристаллах RTP относительно невелико. Так, эффективность преобразования излучения во вторую гармонику в RTP ниже, чем в КТР, в ~ 2 раза [1, 2]. В работе исследуются: генерация второй гармоники (ГВГ) в образцах кристаллов RTP, выращенных на затравку, ориентированную по оси Z (RTP Z-роста), и рассеяние излучения 532 нм в них.

Кристаллы RTP выращивались методом TSSG из раствора в $\text{Rb}_4\text{P}_2\text{O}_7$ по направлениям [100] и [001] в интервале температур выше сегнетоэлектрического перехода. При этих условиях пирамида роста грани (100) получается полидоменной, а пирамиды нарастания граней {201} получаются монодоменными, что связано с разными механизмами роста этих граней. Фронтальная грань (100) формируется ступенями, которые двигаются параллельно плоскости доменных ламелей от подзатравочного дислокационного пучка. Грани {201} в обоих случаях формируют слои, распространяющиеся под углом к плоскости ламелей от ребер с другими гранями. Но оптическая однородность граней {201} заметно ниже, чем грани (100).

Изготовление затворов из материала пирамид роста граней {201} было вызвано тем, что нам не удалось монодоменизировать материал пирамиды роста граней (100) в кристаллах, выросших по [100].

В эксперименте использовался лазер на Nd:YAG, работающий на длинах волн 1064 нм и 532 нм, имеющий следующие характеристики излучения: длительность импульса $\tau = 15$ нс, энергия в импульсе до 20 мДж, частота следования импульсов $f = 10$ Гц, диаметр пучка в зоне расположения исследуемых кристаллов $d = 350$ мкм.

Изучалось рассеяние второй гармоники, возбуждаемой в кристаллах инфракрасным излучением, а также рассеяние в кристаллах излучения на длине волны 532 нм, генерируемого используемым лазером

Обнаружено, что в кристаллах RTP Z-роста имеет место и неколлинеарная ГВГ, и классическое рэлеевское рассеяние. При этом энергия ВГ распределена в полосе (в угле $>20^\circ$ с эффективностью $\eta \sim 10\%$ по центральной области пучка), а рассеянное

излучение на длине волны 532 нм большей частью собрано коллинеарно пучку входного излучения (с эффективностью $\eta \sim 90\%$).

Слои роста в кристаллах RTP Z-роста располагаются под углом к проходящему излучению лазера, на периодической неоднородности, возможно, и возникает неколлинеарная ГВГ. Необходимо снижать паразитное влияние излучения ВГ, для чего следует модернизировать технологию выращивания кристаллов.

Литература

1. *Morozov V., Olenin A., Tunkin V., Yakovlev D., Rusov V., Gorchakov A., Doroganov S.* Picosecond Pulsed-Periodic High-Peak Power Nd:YAG Laser Operationally Controlled by KTP-Based Pockels Cell // Crystals. 2022. No. 12(3). P. 368.
2. *Koval V. V., Viktorov E. A., Balmashnov R. V., Katsev Yu. V., Kornev A. F.* Spectral broadening compensation in 35 ps Nd:YAG regenerative amplifier // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). Saint-Petersburg, June 2022. P. 1.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

В. В. Кабанов, А. О. Негриенко

Институт физики НАН Беларуси, г. Минск
e-mail: a.nehryienka@dragon.bas-net.by

Аннотация. В работе показано, что дискретные измерения в канонически сопряженных координатах могут быть одновременно реализованы с одинаково высокой точностью, носят универсальный характер и сочетаются с теоремой Котельникова — Шеннона — Найквиста и соотношением неопределенности. Последнее накладывает однозначную жесткую связь между дополняющими друг друга пространственным и импульсным представлениями единой физической картины когерентного состояния взаимодействующих лазерных пучков. Высокоточное разрешение интерференционной картины в спектральном k -представлении, прежде всего, раскрывает структуру ее динамического поведения и, как следствие, позволяет выделить отдельные структурные компоненты интерференционной картины, снизить уровень помех, улучшить качество цифровой голограммы, точно определить и воспроизвести амплитудный и фазовый профиль сигнального пучка.

В основе измерения, анализа и управления лазерным пучком положена система адаптивной цифровой голографии с обратной связью, в которой на первом этапе реализуется высокоточное экспериментальное измерение — оцифровка поперечного пространственного распределения интенсивности интерференционной картины (ИК) лазерного излучения с помощью цифровой камеры высокого разрешения. Полученные двумерные массивы численных данных являются основой для эффективного анализа, обработки и управления амплитудным и фазовым профилем лазерного пучка (ЛП) с использованием широкого спектра программных средств. Особое место среди них занимают преобразования Фурье [1–3], обусловленные, прежде всего, возможностью комплексного представления ИК в канонически сопряженных (КС), пространственно-импульсных координатах. Вместе с тем, вычисления — измерения Фурье-образа интенсивности ИК по экспериментально измеренному пространственному представлению регламентируются соотношением неопределенности, которое накладывает определенные условия на их реализацию.

Можно показать, что для любых доверительных интервалов измерения сигнала в КС координатах справедливы соотношения, аналогичные традиционным соотношениям неопределенности, определяемым на интервале, равном среднему квадратичному отклонению пары канонически сопряженных координат: $L_x \cdot F_x \geq \frac{1}{C}$, в которых значение константы C определяется конкретной формой функции распределения и измеряемым интервалом. Отсюда при дискретизации измерений для чисел отсчетов N_x , N_{f_x} и соответствующих шагов разрешения Δx , Δf_x имеем (формулы (1), (2)):

$$\Delta x \cdot \Delta f_x = 1 / CN \quad (1)$$

и

$$\begin{cases} N_x \cdot N_{f_x} = N, \\ N_{f_x} = \varkappa N_x, \end{cases} \quad (2)$$

Система (1; 2) определяет гиперболическую дискретную систему координат, особую роль в которой играет соотношение (1), определяющее обобщенное число отсчетов $\tilde{N} = C \cdot N$, с учетом коммутативной связи между ее компонентами. Это обстоятельство следует учитывать при использовании алгоритмов быстрого дискретного преобразования Фурье [4] для корректного определения Фурье-образа ИК [5].

Высокоточные измерения, одновременно выполненные в канонически сопряженных координатах, носят универсальный характер и сочетаются с теоремой Котельникова — Шеннона — Найквиста [6–9]. При этом измерения могут быть одновременно реализованы с одинаково высокой точностью, т. е. дискретное измерение состояния системы с определенной точностью в одном представлении позволяет одновременно получить дискретно-измеренное состояние системы в канонически сопряженном представлении с такой же точностью, а измеряемый частотный диапазон F_x ограничен сверху частотой Найквиста $F_{Nk} = 1 / 2\Delta x$, т. е. $F_x \leq F_{Nk}$.

Как следствие, высокоточное разрешение ИК в спектральном k -представлении позволяет корректно и с высокой степенью точности реализовать следующее:

- выделить отдельные структурные компоненты ЛП или ИК, ответственные за исходный гауссовый профиль и спекл-структуру, неразличимые в x -представлении;
- снизить уровень помех, обусловленных наличием спекл-структуры и несовершенством оптико-электронных компонентов системы, с помощью прецизионной фильтрации Фурье-образа;
- улучшить качество цифровой голограммы, включая повышение контрастности интерференционного узора;
- точно определить амплитудный и фазовый профиль сигнального пучка.

Все вышеперечисленное повышает эффективность воспроизведения сигнального пучка с заданным профилем интенсивности методом адаптивной цифровой голографии.

Литература

1. *Fourier J.* The Analytical Theory of Heat / Transl. by A. Freeman. Cambridge; London, 1878. 466 p.
2. *Titchmarsh E. C.* Introduction to The Theory of Fourier Integrals. Oxford: The Clarendon Press, 1948. 394 p.
3. *Bracewell R. N.* The Fourier Transform and its Applications. 2nd ed., rev. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986. 486 p.
4. *Nussbaumer H. J.* Fast Fourier transform and convolution algorithms // Springer Series in Information Sciences. Berlin: Springer-Verlag; New York: Heidelberg, 1981. Vol. 2. 273 p.
5. *Кабанов В. В., Негриенко А. О.* Измерение поперечного профиля лазерного пучка в канонически-сопряженных координатах // Nonlinear Dynamics and Applications. Minsk, 2024. No. 30. P. 144–154.
6. *Котельников В. А.* О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Первая Всесоюзная конференция по вопросам связи. 14 января 1933 г. М., 1933. С. 90–108.
7. *Shannon C. E.* A mathematician theory of communication // Bell Sys. Tech. J. 1948. No. 27. P. 379–423, 623–656.
8. *Shannon C. E.* Communication in the presence of noise // Proc. IRE. 1949. No. 37. P. 10–21.
9. *Nyquist H.* Certain Topics in Telegraph Transmission Theory // IEEE. 1928. No. 47. P. 614–617.

ПРОТОТИПИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ЛАЗЕРНЫХ ДИАГНОСТИК МОНИТОРИНГА ЭРОЗИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАК РЕАКТОРОВ

Я. Р. Шубин¹, А. А. Белокур¹, А. Г. Раздобарин^{1, 2}, И. В. Алексеенко²,
Е. В. Шубина¹, Л. А. Снигирев¹, Д. И. Елец^{1, 2}, О. С. Медведев^{1, 2}

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН

² Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта

e-mail: iaroslav.shubin@mail.ioffe.ru

Аннотация. В этой работе представлены первые результаты оптического макетирования комплекса лазерных диагностик на основе частотно-модулируемого лидара (ЧМ-лидар) и двухдлинноволновой цифровой голографической интерферометрии (ДЦГИ) для мониторинга эрозии обращенных к плазме элементов внутренней стенки термоядерных установок.

Разработка диагностик первой стенки является важным шагом развития термоядерных установок следующего поколения. В условиях длительных разрядов и высокой энергонагруженности высокие тепловые нагрузки на обращенные к плазме элементы могут приводить к разрушению и/или модификации материалов внутренней облицовки [1].

Для решения проблемы мониторинга эрозии материалов первой стенки в [2] была предложена модель комплекса лазерных диагностик, включающих ЧМ-лидар и ДЦГИ. Эти методы взаимно дополняют друг друга: лидар используется для получения априорной информации о дистанции до объекта и его наклоне, по этим данным фокусируется система ДЦГИ и в дальнейшем компенсируется фазовый набег. На рис. 1 представлены результаты эксперимента по исследованию рельефа тест-объекта, полученные голографическим методом.

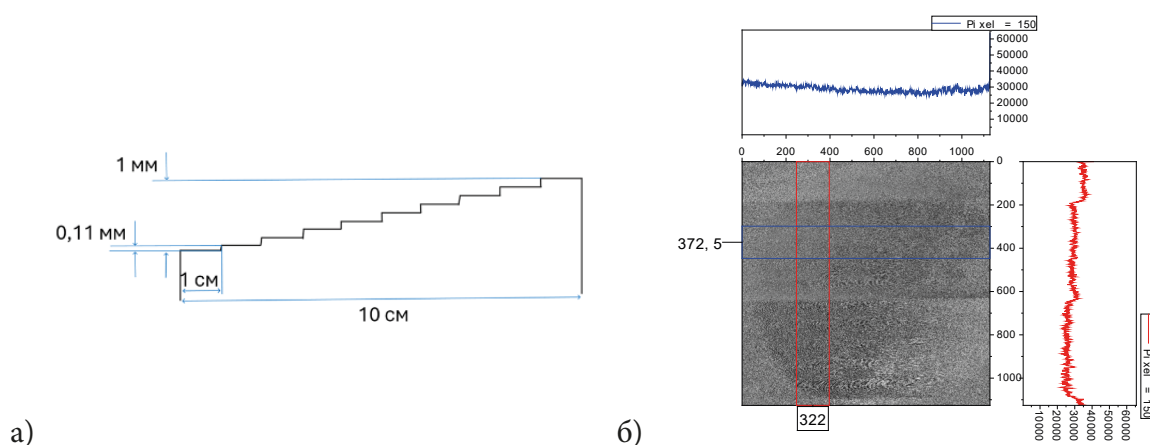


Рис. 1. Схематическое изображение тест-объекта и экспериментальные результаты диагностики методом ДЦГИ

Литература

1. De Temmerman G., Hirai T., Pitts R.A. The influence of plasma-surface interaction on the performance of tungsten at the ITER divertor vertical targets // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2018. Vol. 60. No. 4. P.044018.
2. Razdobarin A. G. et al. Conceptual Project for Diagnostics of Erosion of the First Wall and Divertor of the Tokamak with Reactor Technologies TRT // Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50. No. 4. P.441–456.

МОДУЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С УВЕЛИЧЕНИЕМ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В. А. Алексеев¹, М. Р. Зарипов¹, С. И. Юран², В. П. Усольцев¹

¹ Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

² Удмуртский государственный аграрный университет

e-mail: alekseevv@istu.ru

Аннотация. Рассмотрен источник импульсного лазерного излучения, выходная пиковая мощность оптического излучения которого значительно больше мощности исходного импульса лазерного излучения. Описан состав источника, который строится на основе нескольких звеньев кольцевой волоконной оптической задержки. Приведен принцип действия предложенного источника лазерного излучения.

В работе рассмотрен лазерный источник, который позволяет существенно повысить амплитуду импульса лазерного излучения. Он может быть использован в волоконно-оптических линиях связи, информационно-измерительных системах, в бытовых приборах, в медицине, системах опознавания и наведения, автономных беспилотных аппаратах, для охраны объектов от посторонних и пожара, а также в других областях.

В отличие от известного источника импульсного лазерного излучения [1], рассматриваемый источник состоит из задающего перестраиваемого генератора прямоугольных импульсов, импульсного лазера и нескольких ($I, II, \dots, k$) однотипных звеньев, соединенных последовательно, при этом каждое звено содержит кольцевую оптическую задержку, коммутирующее устройство и счетчик импульсов. Последнее k звено соединено с фокусирующей системой.

Импульсы через период T с задающего генератора поступают на вход импульсного лазера. Далее импульсы с выхода лазера поступают на кольцевую оптическую задержку первого I звена, где импульс оптического излучения циркулирует по кольцу оптоволокну до момента поступления в линию задержки нового импульса от лазера, и цикл продолжается до определенного количества оборотов N_1 . При этом с выхода счетчика импульсов на управляющий вход коммутирующего устройства поступают электрические импульсы с частотой в N_1 раз меньше частоты ($1/T$) импульсов, вырабатываемой задающим генератором. При поступлении электрического импульса со счетчика на управляющий вход коммутирующего устройства последнее переключает канал циркуляции оптического излучения по кольцевой оптической задержке на выход коммутирующего устройства, где формируется импульс оптического излучения с амплитудой, равной сумме интенсивностей импульсов лазерного излучения, поступивших на вход кольцевой оптической задержки за период $N_1 \cdot T$, определяемый периодом следования импульсов со счетчика. Далее усиленный оптический импульсный сигнал с первого I звена источника излучения поступает на кольцевую оптическую задержку второго II звена источника излучения и после заданного числа циркуляций N_2 по линии задержки, определяемого счетчиком второго II звена источника излучения, поступает на вход коммутирующего устройства второго II звена источника излучения и далее на аналогичные элементы звена III . На выходе коммутирующего устройства последнего k звена усиленный лазерный пучок фокусируется фокусирующей системой. При этом частота следования импульсов на выходе устройства будет в $N_1 \cdot N_2 \cdot \dots \cdot N_k$ раз ниже частоты ($1/T$) излучаемых лазером исходных импульсов.

Литература

1. Патент № 189 439 Российская Федерация. МПК7 H01S 3/10, G02B 6/00. Источник импульсного лазерного излучения: опубл. 22.05.2019. Бюл. № 15.

НАЧАЛЬНЫЕ СТАДИИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СКРИМИОНОВ

В. С. Макин^{1, 2}, Р. С. Макин³

¹ Филиал АО «Корпорация “Комета”» — «НПЦ ОЭКН»

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого —
Институт ядерной энергетики

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
e-mail: vladimir.s.makin@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены особенности упорядоченного разрушения поверхностей конденсированных сред (КС) лазерным излучением в виде массивов или единичных оптических скирмионов (ОС). Показано, что начальные стадии разрушения КС идут через образование субволновых ОС.

К числу структур упорядоченного разрушения поверхностей конденсированных сред ультракороткими импульсами (УКИ) лазерного излучения (ЛИ) относят оптические скирмионы (ОС). Например, при последовательном облучении двумя пучками УКИ ЛИ ($\lambda = 532$ нм, $\tau = 550$ фс) ортогональной поляризации на поверхности кристаллической пленки черного фосфора наблюдали образование кольца, пространство в пределах которого представляло собой массив плотно упакованных ОС гексагонального типа, с характерным субволновым пространственным масштабом $S = 3\lambda / 64\zeta \approx 24$ нм, $\zeta \approx 1$, растущим с ростом Q [1].

При действии по нормали к поверхности (111) c-Si, граничащей с водой, ЛИ ($\lambda = 400$ нм, $\tau = 100$ фс) на ранних стадиях воздействия ($N = (1 \div 10)$) было обнаружено образование круговых структур [2]. Сформированные в результате воздействия одного или нескольких импульсов ЛИ круговые структуры мы трактуем как оптические скирмионы (ОС) кругового типа, поскольку выполнены условия для возбуждения ППП. Пространственные масштабы S нескольких круговых структур при $N = 1$ и $N = 2$, включая минимальный, вместе с теоретическими формулами в рамках нелинейной математической модели (НММ) лазерно-индуцированного разрушения конденсированных сред, следующие: $S_1 = 8\lambda / 5n\zeta \approx 400$ нм, $\zeta \approx 1$; $S_2 = 12\lambda / n\zeta \approx 3,6$ мкм, $\zeta \approx 1$; $S_3 = 22\lambda / 5n\zeta \approx 1,31$ мкм, $\zeta \approx 1,01$; $S_4 = 24\lambda / n\zeta \approx 7,1$ мкм, $\zeta \approx 1,02$, $\zeta \geq n = 1,33$. Величины S квантованы и принимают теоретические значения из последовательности порядка Шарковского.

Начальные стадии разрушения поверхностей конденсированных сред УКИ ЛИ в виде существенно субволновых пространственных областей часто связывают с проявлением их несовершенств в виде различных исходных или индуцированных кристаллических дефектов, включая нанотрешины. Предлагается иное объяснение, основанное на возбуждении ЛИ ОС. Экспериментально для кварцевого стекла при воздействии серии импульсов линейно поляризованного УКИ ЛИ ($\lambda = 1030$ нм, $\tau = 350$ фс, $Q = 3,7$ Дж/см², $\nu = 200$ кГц, нормальное падение), с изменением числа импульсов N [3], при $N = 50$ обнаружено образование хаотически распределенных пространственных областей разрушения поверхности кругового типа с существенно субволновыми масштабами, которые мы отождествляем с ОС кругового типа с $S_1 = \lambda / 100\zeta \approx 10$ нм, $S_2 = \lambda / 50\zeta \approx 20$ нм, где $\zeta \geq 1$. Предполагается, что локально в областях разрушения достигаются концентрации электронов, отвечающие возбуждению на границе раздела с воздухом ППП. С ростом N до 100 возрастала плотность ОС, глубина разрушения и пространственный масштаб.

Литература

1. *Lee Y., Choi W., Jang M., Park W.-W., Kim K., Park Q.-H., Kwon O.-H.* Tailoring Two-Dimensional Matter Using Strong Light-Matter Interactions. // *Nano Letters*. 2023. No. 23. P.3645–3652.
2. *Shen M. Y., Crouch C. H., Carey J. E., Mazur E. A.* Femtosecond laser-induced formation of submicrometer spikes on silicon in water. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 85. No. 23. P.5694.
3. *Sakakura M., Lei Y., Wang L., Yu Y.-H., Kazansky P. G.* Ultralow-loss geometric phase and polarization shaping by ultrafast laser writing in silica glass. // *Light Science & Applications*. 2020. No. 9. P.15.

МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

И. Е. Гусаров^{1, 2}, А. И. Калугин², Е. А. Антонов², М. Ю. Альес²

¹ ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова»

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
e-mail: gusarovie@udman.ru

Аннотация. В работе представлен метод оптимизации параметров лазерных сканирующих устройств, основанный на оценке вероятности обнаружения объекта в сканируемой области. Предложен способ оценки вероятности обнаружения, заключающийся в вычислении отношения среднего времени достижения центром лазерного пятна некоторой точки на траектории, по которой происходит сканирование пространства, к полному времени формирования кадра. Получено аналитическое выражение, связывающее внешние и внутренние параметры сканирующей системы с вероятностью обнаружения объекта при построном формировании кадра сканирования.

В настоящее время технология лазерного сканирования находит применение в областях деятельности человека, требующих осуществления обзора пространства в режиме реального времени. Такие задачи, как обнаружение быстро движущихся малых объектов или зондирование областей пространства с динамично изменяющимся составом, могут накладывать строгие требования к отдельным инженерным узлам сканирующей системы [1]. Например, для исследования пространства с широким угловым размером за малое время потребуется использовать лазерное пятно малого радиуса и высокочастотный лазерный источник. Немаловажной является траектория сканирования. Ее форма зависит от используемых сканирующих элементов и от их рабочих характеристик [2]. Наиболее часто в лазерном сканировании применяются такие траектории, как: построчная, спиральная, фигуры Лиссажу. При выборе формы траектории можно воспользоваться таким оценочным параметром, как вероятность обнаружения объекта, определяемым как отношение среднего времени достижения центром лазерного пятна некоторой точки на траектории, по которой происходит сканирование пространства, к полному времени формирования кадра. Таким образом, для оптимизации параметров сканирующих систем с точки зрения повышения вероятности обнаружения объекта требуется получить аналитические выражения, связывающие оптимизируемые параметры узлов сканирующего устройства с вероятностью обнаружения объекта при использовании некоторой траектории заполнения пространства. Применительно к случаю, при котором сканирующую систему составляют призмный дефлектор и качающееся зеркало, получаем следующее выражение, формула (1):

$$P = \frac{R\omega_1 \left(\sqrt{\gamma - 1} + (2 + \gamma) \arcsin \left(\sqrt{\frac{1}{\gamma}} \right) \right) + \frac{L\omega_2}{2}}{2 \arcsin \left(\sqrt{\frac{1}{\gamma}} \right) \omega_1 R + L\omega_2}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{2U_0}{\omega_2 H}$; L и H — горизонтальный и вертикальный линейный размер сканируемой области соответственно; ω_1 и ω_2 — угловые частоты вращения призмного дефлектора и качающегося зеркала соответственно; R — радиус окружности, вписанной в призмный дефлектор; U_0 — максимальная скорость движения точки вдоль траектории относительно оси ОУ.

Таким образом, в работе показано, что вероятность обнаружения объекта в сканируемой плоскости в случае построчного сканирования зависит от линейных размеров исследуемого пространства и параметров сканирующих элементов.

Литература

1. *Калугин А. И.* Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов / А. И. Калугин, М. Р. Зарипов, Е. А. Антонов // Интеллектуальные системы в производстве. 2020. Т. 18. № 1. С. 9–14.
2. *Артамонов С. И.* Выбор сканера для лазерной локационной системы / С. И. Артамонов, Н. А. Грязнов, В. И. Купренюк и др. // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 9. С. 51–59. EDN WRLEFP.

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ВЕРОЯТНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛА ЛАЗЕРНОЙ ЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Д. Н. Кочурова^{1, 2}, А. И. Калугин¹, Е. А. Антонов¹, М. Ю. Альес¹

¹ ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»

² Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова
e-mail: darya310898@gmail.com

Аннотация. В работе выполнено исследование возможности распознавания формы поверхности объекта на основе его дальностного портрета, а также возможности определения типа объекта по его дальностному портрету в зависимости от величины отношения сигнал/шум. Выполнено численное моделирование прохождения лазерного импульса через участок с атмосферной неоднородностью аэрозольного типа.

В ближайшее десятилетие значительно возрастет круг применений методов импульсной лазерной локации в технологиях машинного зрения, автомобильных лидарах, в областях человеческой деятельности, где особо важно получать информацию об объектах окружающей среды в режиме реального времени. Дополнительной информацией для эффективной работы локационной системы является дальностный профиль или портрет объекта (ДП), который представляет собой функцию зависимости мощности отраженного оптического сигнала от времени и содержит информацию о структуре и форме объекта [1–3].

Значительно усложняет задачу распознавания наличие шумов, искажающих лазерный сигнал. Для повышения вероятности правильного распознавания необходимо уменьшить величину шума при сохранении информационной составляющей сигнала. Для этого была разработана простая нейронная сеть, реализующая метод регрессии и состоящая из двух сверточных и трех полносвязных слоев. Для обучения сети были применены модельные сигналы, состоящие из элементарных математических функций с наложением разного уровня шума. Обработка исследуемого сигнала нейросетью приводит к увеличению вероятности правильного распознавания сигналов.

Работоспособность метода проверена на смоделированных зашумленных сигналах, полученных от разных простых объектов и самолета F16, ДП которого получен в [4]. Причем в ходе моделирования части сигналов могли случайным образом перекрываться друг другом. Получено, что в широких пределах отношения сигнал/шум можно обнаруживать сигнал самолета F16 (рис. 1). Применение нейросети для уменьшения шумов приводит к увеличению вероятности распознавания.

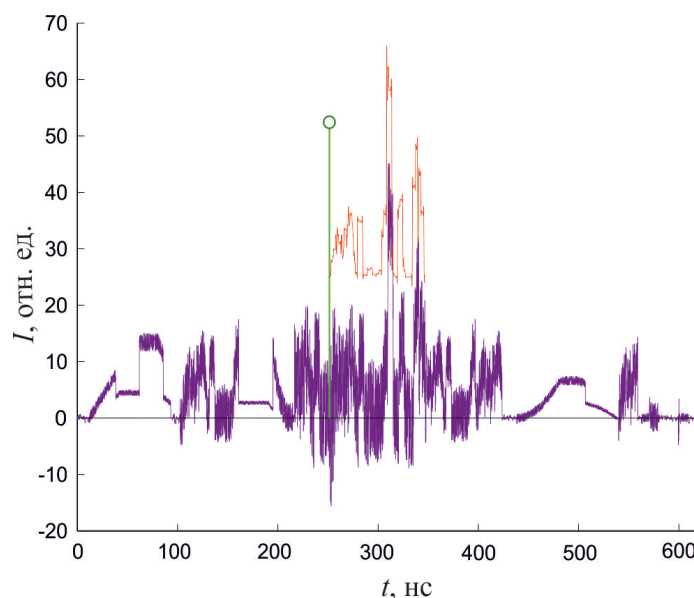


Рис. 1. Пример распознавания сигнала сложного объекта при отношении сигнал/шум = 3 (ДП самолета F16 нарисован красным цветом, вертикальная линия обозначает начало обнаруженного сигнала)

Крупномасштабные локальные неоднородности в атмосфере типа тумана или дыма могут существенно искажать временную зависимость мощности лазерного сигнала. Очевидно, что характер искажения лазерного импульса определяется конкретным видом зависимости показателя преломления от координат. Нами выполнено численное моделирование прохождения лазерного импульса через участок с квадратичным распределением показателя преломления (формула (1)) вида:

$$n = n_0 + (1 - n_0) \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \right), \quad (1)$$

где ось OZ направлена вдоль распространения пучка, ось OX лежит в горизонтальной плоскости перпендикулярно OZ , начало отсчета координат находится в центре участка.

Показано, что крупномасштабные атмосферные помехи могут приводить к принципиальным изменениям формы сигнала и, следовательно, к ошибкам распознавания типа элементарной поверхности. Однако для объектов со сложной формой поверхности такие искажения не критичны.

Таким образом, возможно распознавать объекты с помощью их ДП. Применение нейросети для уменьшения шумов приводит к увеличению вероятности распознавания объектов.

Литература

1. Steinvall O., Tulldahl M., Berglund F., Allard L. Laser profiling for airborne target classification // Proc. of SPIE. 2018. Vol. 10636. P. 1063602.
2. Li D., Xu L., Xie X., Li X., Chen J., Chen J. Co-path full-waveform lidar for detection of multiple along-path objects // Optics and Laser in Engineering. 2018. No. 111. P. 211–221.
3. Лабунец Л. В., Борзов А. Б., Ахметов И. М. Распознавание 3D-объектов в однопозиционной системе лазерной локации методами интеллектуального анализа импульсных отражательных характеристик // Оптический журнал. 2022. № 89(4). С. 40–51.
4. Schoemaker R., Benoist K. Characterisation of small targets in a maritime environment by means of laser range profiling // Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8037.

КРИСТАЛЛ $\text{Er,Yb:GdMgB}_5\text{O}_{10}$ КАК АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ЛАЗЕРОВ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В ОБЛАСТИ 1,5–1,6 МКМ

К. Н. Горбаченя¹, Е. А. Волкова², В. В. Мальцев², В. Э. Кисель¹

¹ НИЦ оптических материалов и технологий, БНТУ, Минск

² МГУ им. М. В. Ломоносова

e-mail: gorby@bntu.by

Аннотация. При использовании кристалла $\text{Er,Yb:GdMgB}_5\text{O}_{10}$ реализована лазерная генерация в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем на основе тонкого слоя Cr:ZnS . Получены лазерные импульсы длительностью 24 нс, энергией 3 мкДж и частотой следований 50 кГц на длине волны 1568 нм.

Лазеры на основе эрбий-иттербиевых материалов, излучающие в спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм, находят широкое применение в дальнометрии и системах оптической локации. Данная работа посвящена изучению генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:GMBO в непрерывном режиме и режиме пассивной модуляции добротности. Монокристаллы $\text{Er}(2 \text{ ат. \%}), \text{Yb}(12 \text{ ат. \%}): \text{GMBO}$ выращены методом раствор-расплавной кристаллизации [1]. Исследование генерационных характеристик кристалла Er,Yb:GMBO проводилось в конфигурации лазера (рис. 1). Для накачки использовался InGaAs лазерный диод с волоконным выводом излучения (диаметр волокна 105 мкм, числовая апертура 0,22), излучающий на длине волны около 980 нм. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент в пятно с диаметром 120 мкм. Активный элемент толщиной 1,5 мм, ориентированный для распространения излучения накачки вдоль главной оси оптической индикатрисы N_m , закреплялся на медном теплоотводе. На обе полированные грани кристалла наносились антиотражающие покрытия в спектральных областях накачки и генерации. Для реализации режима пассивной модуляции добротности использовался насыщающийся поглотитель — кристаллический слой Cr:ZnS толщиной 5,8 мкм с пропусканием 98,8 % на длине волны 1568 нм, нанесенный на сапфировую подложку толщиной 1 мм методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Зависимость средней выходной мощности от поглощенной мощности накачки лазера на основе кристалла Er,Yb:GMBO в режиме пассивной модуляции добротности приведена на рис. 2. Лазерные импульсы с энергией до 3 мкДж и длительностью 24 нс были получены на длине волны 1568 нм. Частота следования импульсов достигала 50 кГц при падающей мощности накачки 9 Вт. Осциллограмма цуга импульсов лазера представлена на рис. 3.

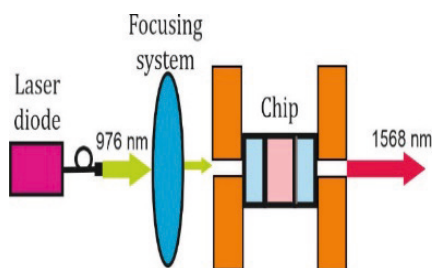


Рис. 1. Схема макета лазера

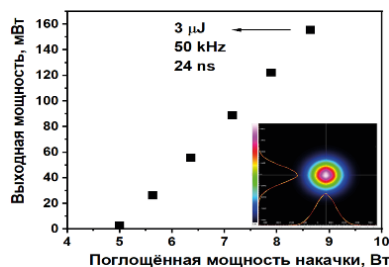


Рис. 2. Зависимость выходной мощности от поглощенной мощности

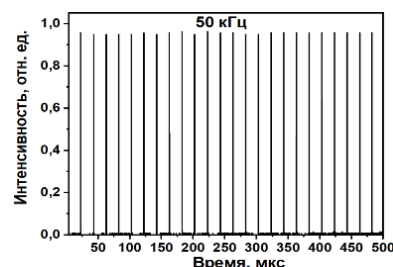


Рис. 3. Осциллограмма цуга импульсов

Литература

1. *Gorbachenya K.N.* et al. Spectral-luminescent properties of yttrium-magnesium pentaborate crystals co-doped with Er^{3+} and Yb^{3+} // J. of Applied Spectroscopy. 2021. No. 87. P. 1043–1049.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ И ЗНАКА ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЗАРЯДА СФОКУСИРОВАННОГО ВИХРЕВОГО ПУЧКА

Н. Д. Кундикова^{1, 2}, Э. А. Бибилова^{1, 2}, И. Д. Ивченко^{1, 2}

¹ Институт электрофизики УрО РАН

² Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)

e-mail: iwilgm@gmail.com

Аннотация. Представлен способ определения положения перетяжки и знака топологического заряда вихревого пучка по динамике дифракционной картины, получаемой с помощью непрозрачного прямоугольного экрана.

На данный момент наиболее распространенный способ определения знака дислокации волнового фронта (топологического заряда) методом интерференции [1] требует дополнения установки для получения интерференции между пучками с дислокацией волнового фронта и пучком Гаусса. Тем не менее, для некоторых технических нужд может потребоваться способ быстрого определения знака, но не величины, топологического заряда и положения перетяжки сходящегося вихревого пучка.

Разработан способ определения положения перетяжки пучка с дислокацией волнового фронта по динамике дифракционной картины, получаемой с помощью непрозрачного прямоугольного экрана по аналогии со способами [2, 3]. Для этого пучок с дислокацией волнового фронта перекрывался вертикально наполовину непрозрачным экраном и затем фокусировался линзой. Было проведено моделирование распространения при этих условиях пучка Гаусса, в который была введена дислокация волнового фронта, с помощью быстрого преобразования Фурье.

На рис. 1 представлено полученное в результате моделирования поперечное распределение интенсивности пучка с топологическим зарядом +6 для различных расстояний от перетяжки в обе стороны. Анализ динамики дифракционной картины показывает, что происходит ее поворот в том же направлении, в котором закручивается волновой фронт пучка. В случае положительного знака топологического заряда происходит поворот дифракционной картины против часовой стрелки при удалении точки наблюдения от линзы, при отрицательном знаке топологического заряда дифракционная картина поворачивается по часовой стрелке. Также в положении перетяжки (позиция 0,00 мм) картина симметрична относительно границы экрана, и это является критерием для метода определения места нахождения перетяжки.

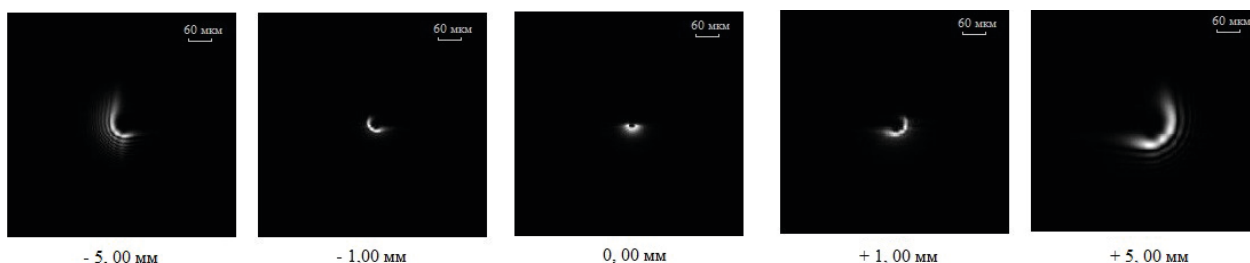


Рис. 1. Поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с величиной топологического заряда +6, усеченного наполовину справа до линзы с фокусным расстоянием 100 мм, на различном расстоянии до и после положения перетяжки.

Наблюдение в направлении распространения пучка

Результаты моделирования подтверждаются экспериментально. На рис. 2 приведено экспериментально полученное поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с дислокацией волнового фронта $+6$, усеченного наполовину заслонкой справа до линзы с фокусным расстоянием 100 мм. Аналогично результатам моделирования дифракционная картина в положении перетяжки симметрична относительно края заслонки. Поворот дифракционной картины при удалении точки наблюдения от линзы происходит против часовой стрелки, что совпадает с результатами моделирования. Точность определения перетяжки при данном способе составляет 1 %. Аналогичные результаты с той же точностью показывает данный метод для линзы с фокусным расстоянием 40 мм.

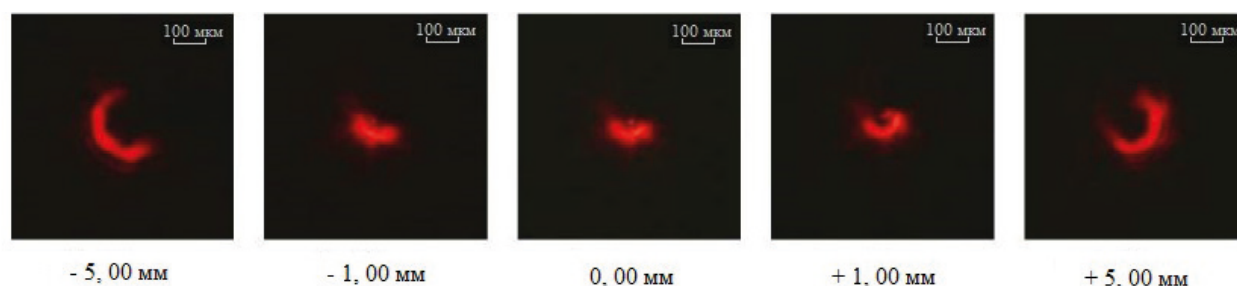


Рис. 2. Поперечное распределение интенсивности сфокусированного пучка с величиной топологического заряда $+6$, усеченного наполовину заслонкой справа до линзы с фокусным расстоянием 100 мм, на различном расстоянии до и после положения перетяжки.
Наблюдение в направлении распространения пучка

Литература

1. Скиданов Р.В., Ганчевская С.В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами // Компьютерная оптика. 2014. № 38. С. 463–468.
2. Bibikova E. A., Al-wassiti N., Kundikova N. D. Diffraction of a Gaussian beam near the beam waist // J. Eur. Opt. Soc. 2019. No. 15. P. 17–20.
3. Bekshaev A., Mikhaylovskaya L. Displacements of optical vortices in Laguerre — Gaussian beams diffracted by a soft-edge screen // Opt. Commun. 2019. No. 447. P. 80–88.

ЭФФЕКТИВНЫЙ ПАССИВНЫЙ МОДУЛЯТОР ДОБРОТНОСТИ ЛАЗЕРОВ С РАБОЧЕЙ ДЛИНОЙ ВОЛНЫ В ОБЛАСТИ 2 МКМ

*В. Н. Иванов, А. А. Онущенко, С. С. Запалова, Т. В. Зотова,
С. И. Никитина, А. Н. Титов, А. В. Шашкин*

АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: vnivan@mail.ru

Аннотация. В работе представлены материалы исследования и аппроксимации в рамках 4-уровневой модели кривой насыщения просветления стекла с нанокристаллами PbS, а также сравнение эффективности работы 2-микронного лазера в режимах пассивной и активной модуляции добротности. Активные элементы излучателей были изготовлены из кристаллов $KY(WO_4)_2:Tm, Ho$ и $KLu(WO_4)_2:Tm, Ho$. В качестве активного затвора использовался электрооптический затвор на кристалле RКТР, образцы пассивных затворов были изготовлены из калиево-цинково-силикатных стекол, содержащих нанокристаллы PbS со средним размером порядка 10 нм.

Для исследований были специально разработаны компактные лазеры (размеры активных элементов из кристалла $KYW:Tm, Ho$ — $\varnothing 1,6 \times 15$ мм и из кристалла $KLu(WO_4)_2:Tm, Ho$ — $\varnothing 2,2 \times 20$ мм), с поперечной накачкой и активной модуляцией добротности при помощи ЭОЗ на кристалле RКТР генерировали моноимпульсы со следующими параметрами: длительность 25 нс, 15 мДж, и 22 нс, 30–40 мДж соответственно, при поперечной накачке в пределах 1–1,5 Дж на длине волны 802–806 нм.

Проведены измерения пропускания образцов в зависимости от интенсивности накачки на длине волны $\lambda = 2,056$ мкм. Показано, что в исследованных насыщающихся поглотителях может быть реализован контраст до 10–12, что соответствует полученным ранее значениям для натриево-цинково-силикатных стекол с PbS [1, 2]. На рис. 1 приведен график пропускания образца калиево-цинково-силикатного стекла с PbS.

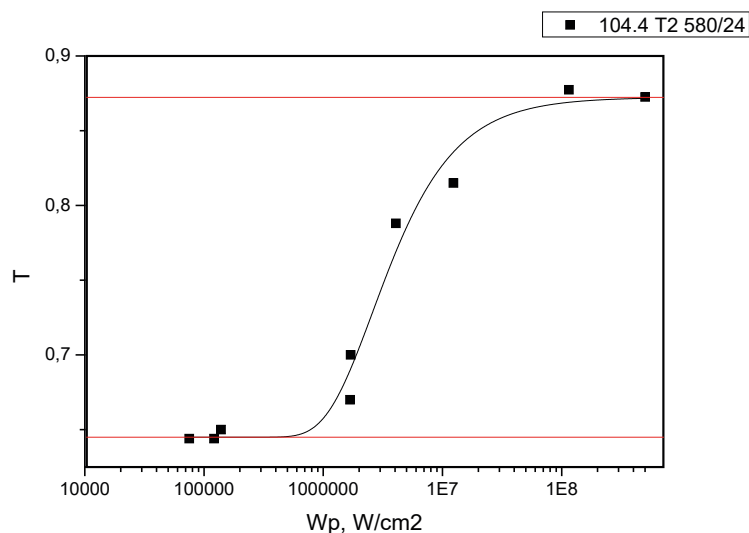


Рис. 1. Аппроксимация кривой насыщения поглощения образца в рамках 4-уровневой модели [3] кривой насыщения поглощения образца из калиево-цинково-силикатного стекла с PbS со средним размером порядка 10 нм

В рамках работы были проведены исследования генерации лазера с пассивной модуляцией добротности затвора на базе затвора из стекол с квантовыми точками PbS.

Литература

1. *Gaponenko M. S., Denisov I. A., Kisel V. E., Malyarevich A. M., Zhilin A. A., Onushchenko A. A. et al. Diode-pumped Tm:KY(WO₄)₂ laser passively Q-switched with PbS-doped glass // Appl. Phys. B. 2008. No. 93. P. 787–791.*
2. *Loiko P., Serres J. M., Mateos X., Yumashev K., Malyarevich A., Onushchenko A., Petrov V. et al. Ho:KLu(WO₄)₂ Microchip Laser Q-Switched by a PbS Quantum-Dot-Doped Glass // IEEE Photon. Techn. Lett. 2015. No. 27. P. 1795–1798.*
3. *Kercher M. An Analysis of Saturable Absorbers // Appl. Opt. 1967. No. 6. P. 947–954.*

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ АНОМАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УКИ ЛИНЕЙНО ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В. С. Макин^{1, 2}, Р. С. Макин³

¹ Филиал АО «Корпорация “Комета»» — «НПЦ ОЭКН»

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого —
Институт ядерной энергетики

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
e-mail: vladimir.s.makin@gmail.com

Аннотация. Предложена модель образования связанных ортогональных решеток на поверхностях халькогенидных стеклообразных полупроводников под действием УКИ лазерного излучения, основанная на образовании нелинейного динамического волновода.

К настоящему времени опубликован цикл работ, посвященных образованию упорядоченных структур на поверхностях халькогенидных стеклообразных полупроводников (ХСП) под действием линейно поляризованного ультракороткоимпульсного лазерного излучения [1, 2]. Объяснение природы их образования фактически отсутствует: не объяснены последовательность появления решеток, их периоды и ориентация. Известно, что ХСП обладают более выраженными нелинейными свойствами по сравнению, например, с германием и кремнием [3]. В данной публикации на основе анализа экспериментальных работ по формированию упорядоченных нано/микро-структур на поверхностях ХСП УКИ лазерным излучением (ЛИ) предложена модель их образования, основанная на образовании нелинейного полевого динамического волновода и интерференционных решеточных структур. Явление рассмотрено на примере типичных ХСП As_2S_3 и As_2Se_3 .

Особенностью ХСП является образование при низких плотностях энергии Q лазерного излучения anomalно ориентированных решеточных структур $\mathbf{g} \perp \mathbf{E}$, обладающих значительным разбросом значений периодов (d), что не позволяет интерпретировать решетки $\mathbf{g}$ как обусловленные интерференцией с участием поверхностных плазмон-поляритонов (ППП). Здесь $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля лазерного излучения. Если учесть нелинейные свойства ХСП [2], то возможно образование нелинейного динамического волновода, возбуждения в нем волноводных мод (ВМ) ТЕ типа и их интерференция с падающим ЛИ [3]. Существенно, что Фурье-преобразование рельефа решеточных структур $\mathbf{g}$ демонстрирует разброс периодов (d), характерный для интерференции с участием ВМ, а не ППП, поскольку $\frac{1}{n + \Delta n} \leq \frac{d}{\lambda} \leq \frac{1}{n}$, где $\Delta n = n_2 I$ — нелинейная добавка к показателю преломления, I — интенсивность ЛИ. После образования первичных структур $\mathbf{g}$ с ростом Q (или числа импульсов N) появляются вторичные решетки $\mathbf{G} \parallel \mathbf{E}$, которые обусловлены взаимной интерференцией ВМ близких направлений распространения. С ростом Q (или N) структуры $\mathbf{G}$ становятся доминирующими. Их период D для As_2S_3 и $\lambda = 515$ нм $D = \lambda / \xi \approx 490$ нм [1], $\xi \geq 1$ и $D / d \sim 3$. Оценка величины n_2 , выполненная по результатам экспериментальных данных [2] для $\lambda = 3$ мкм и As_2S_3 , дает $n_2 = 0,69$ ТВт/см² и $n_2 = 0,85$ ТВт/см² для As_2S_3 . Предложенная модель аналогична модели образования нелинейного динамического волновода и решеточных структур под действием УКИ ЛИ на поверхностях полупроводников [3]. Таким образом, впервые предложена модель образования связанных ортогональных решеточных структур $\mathbf{g}$ и $\mathbf{G}$ в ХСП, основанная на интерференции ВМ ТЕ типа лазерно-индуцированного нелинейного динамического волновода.

Литература

1. *Shuleiko D., Zobotnov S., Sokolovskaya O., Poliakov M., Volkova L., Kunkel T., Kuzmin E., Danilov P., Kudryashov S., Pepelayev D., Kozyukhin S., Golovan L., Kashkarov P.* Hierarchical Surface Structures and Large-Area Nanoscale Gratings in As_2S_3 and As_2Se_3 Films Irradiated with Femtosecond Laser Pulses // *Materials*. 2023. No. 16. P.4524.
2. *You C., Dai S., Zhang P., Xu Y.* Mid-infrared femtosecond laser-induced damages in As_2S_3 and As_2Se_3 chalcogenide glasses // *Scientific Reports*. 2017. No. 7. P.6497.
3. *Макин В.С., Пестов Ю.И., Макин Р.С.* Образование Керровского волновода и микрорешеток на поверхности германия под действием фемтосекундного излучения среднего ИК диапазона // *Оптика и спектроскопия*. 2017. Т. 123. № 2. С.94–98.

ОПТИЧЕСКИЙ АТТЕНУАТОР VO₂ ДЛЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Антонов, И. М. Белоусова, А. П. Жевлаков, А. С. Наривончик

АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: aa18322@yandex.ru

Аннотация. Разработан оптический attenuator VO₂, способный плавно регулировать интенсивность лазерного излучения в диапазоне 6–8 микрон, для офтальмологии и ангиохирургии. Это устройство, управляемое подачей лазерных импульсов продолжительностью 10 нс с высокой частотой повторения, было экспериментально исследовано. Было установлено, что скорость переключения VO₂ из-за фазового перехода «полупроводник — металл» и обратного восстановления исходного состояния может осуществляться в ГГц диапазоне частоты повторения подаваемых лазерных импульсов.

Авторы разработали оптический attenuator VO₂, способный плавно регулировать интенсивность лазерного излучения в диапазоне 6–8 микрон. Attenuator содержит нелинейно-оптический элемент с покрытием VO₂, нанесенным на пластину из монокристаллического германия. По внешнему краю нелинейно-оптического элемента был установлен спиральный нагреватель. При температуре нагрева 50–52 °С коэффициент пропускания элемента составлял 88–85 %, что соответствовало полупроводниковой фазе моноклинного состояния пленки VO₂. При воздействии лазерных импульсов продолжительностью 12 нс с плотностью энергии ~100 МДж/см² пропускание уменьшалось на 3,5 порядка из-за фазового перехода VO₂ в металлическое состояние.

Использовался ОРО-лазер Tm:YLF-Ho: YAG-ZGP, излучающий в диапазоне 6–8 мкм с энергией импульса 1–10 МДж на частоте до 1000 Гц [1]. Использование лазера ZGP ОРО имеет хорошие перспективы для клинического применения.

Для определения скорости переключения оптического attenuатора при облучении лазерными импульсами использовалась оптическая схема с оптической линией задержки. В этом случае каждый лазерный импульс воздействовал на элемент с покрытием VO₂ вдоль одной и той же оптической оси дважды с интервалом в 20 нс без заметного уменьшения амплитуды и искажения сигнала (рис. 1а). Повторяемость заданных значений передачи в заданном динамическом диапазоне регулирования мощности лазерного излучения реализуется без искажения сигнала (рис. 1б).

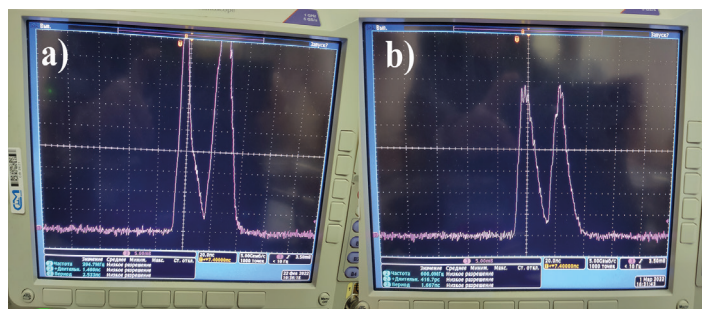


Рис. 1. Сигналы лазерных импульсов на выходе attenuатора:
а) $T = 52\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $T = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таким образом, было установлено, что скорость переключения оптического attenuатора VO₂ из-за фазового перехода «полупроводник — металл» и обратного восстановления исходного состояния, может осуществляться в ГГц диапазоне частоты повторения подаваемых лазерных импульсов.

Литература

1. *Serebryakov A. V., Narivonchik A. S., Kalintseva N. A., Skvortsov D. V., Doroganov S. V.* Repetitively-Pulsed Mid-IR Laser for Precise Microsurgery Conference // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). (Saint-Petersburg), 2018.

Секция 8

НЕЙРОИКОНИКА (ФОРМА И ЦВЕТ)

СВЯЗЬ ОПТИКИ ГЛАЗА С РЕТИНОТОПИКОЙ И ОПТИЧЕСКИМИ ИЛЛЮЗИЯМИ

В. М. Бондарко

ФГБУН «Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН»
e-mail: vmbond@gmail.com

Аннотация. В данной работе была исследована связь оптики глаза с ретинотопикой и оптическими иллюзиями. Рассмотрены проведенные психофизические эксперименты по изучению иллюзий, а также по оценке остроты зрения и краудинг-эффекту. Сравниваются данные, полученные в результате исследований.

Были сопоставлены известные из литературы результаты исследований оптики глаза и ретинотопики сетчатки с полученными в психофизических экспериментах данными по оценке остроты зрения и краудинг-эффекта, а также по изучению таких оптических иллюзий, как вертикально-горизонтальная иллюзия, иллюзия Эббингхауза и иллюзии наклона. Прослеживается влияние оптики глаза и ретинотопики на возникновение этих иллюзий. Изменение этих иллюзий в онтогенезе свидетельствует о существенном вкладе в возникновение иллюзий нейронных структур.

Оптика глаза вносит искажения в изображения, проецируемые на сетчатку. Изображения на сетчатке часто получаются более крупными, асимметричными и искривленными. В результате могут возникать различные зрительные иллюзии, которые стали называть оптическими. В исследовании проводится сопоставление оптических иллюзий с возможным искажением изображений оптикой глаза. Рассматривается проблема связи ретинотопики сетчатки с оптикой глаза, а также с организацией первичной зрительной коры. Проведены психофизические эксперименты по изучению вертикально-горизонтальной иллюзии, иллюзий Эббингхауза и наклона, а также по оценке остроты зрения и краудинг-эффекту (рис. 1). Сравниваются данные, полученные на большой группе наблюдателей различного возраста.

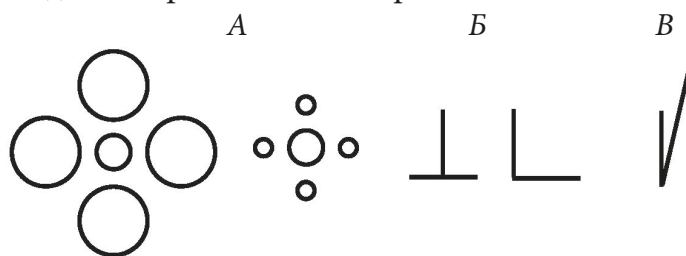


Рис. 1. Примеры использованных в психофизических экспериментах изображений:

- А — иллюзия Эббингхауза (центральные круги имеют одинаковый размер);
- Б — вертикально-горизонтальная иллюзия (все линии одинаковой длины);
- В — иллюзия наклона (тестируемая линия кажется отклоненной в присутствии изображения с другой ориентацией)

Получены оценки остроты зрения и краудинг-эффекта, а также искажений физических параметров для всех разновидностей стимулов. Зрительная система формируется в онтогенезе. Ранее [1, 2] была показана согласованность функции рассеяния точки оптикой глаза с расположением фоторецепторов на сетчатке и организацией самых высокочастотных рецептивных полей зрительной коры, обеспечивающих остроту зрения наблюдателей. Острота зрения и краудинг-эффект для оформленных изображений стабилизируются к 9 годам. Такая же зависимость от возраста характерна и для оценки размера одиночных изображений. В то же время оценки размера и наклона в иллюзиях меняются вплоть до 18 лет. По литературным данным, расположение фоторецепторов на сетчатке зависит от ориентации [3], но не может объяснить различия в восприятии в разных ориентациях.

Литература

1. Шелепин Ю. Е., Бондарко В. М. Острота зрения — согласованность оптических и нейронных механизмов // Офтальмохирургия и терапия. 2002. № 2(1). С. 10–19.
2. Shelepin Y. E., Bondarko V. M. Resolving ability and image discretization in the visual system // Neuroscience and Behavioral Physiology. 2004. No. 34. P. 147–157.
3. Kupers E. R., Benson N. C., Carrasco M., Winawer J. Asymmetries around the visual field: From retina to cortex to behavior // PloS computational biology. 2022. No. 18(1). P. e1009771.

ОПТИЧЕСКАЯ ИЛЛЮЗИЯ ЦОЛЬНЕРА ПРИ ИНТЕРПОЛЯЦИИ

В. М. Бондарко, С. Д. Солнушкин, В. Н. Чихман

ФГБУН «Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН»
e-mail: vmbond@gmail.com

Аннотация. В данной работе рассматривалось исследование восприятия оптической иллюзии Цольнера при интерполяции. Были рассмотрены и проанализированы результаты проведения психофизических экспериментов по восприятию данной оптической иллюзии.

В психофизических экспериментах сравнили восприятие оптической иллюзии Цольнера (кажущееся отклонение прямой линии от исходной ориентации при наложении на нее наклонных штрихов) для реальных и мысленно проведенных через точки интерполированных линий. Получено искажение в восприятии ориентации интерполированных линий, подобное искажению для реальных линий. Результат свидетельствует о высоком уровне проявления иллюзии Цольнера и связанной с ней иллюзии наклона, а также о влиянии на интерполяцию дополнительных изображений.

В экспериментах использовали сплошные или воображаемые, проведенные через точки, интерполированные линии (рис. 1). На линии могли быть наложены наклонные штрихи. Референтные реальные и интерполированные линии имели ориентацию $90 \pm 2^\circ$ или $45 \pm 2^\circ$. Сравнивали ориентацию линий с наклоном одиночных тестовых линий с меняющейся ориентацией. Варьировали расстояние между точками и длину линий.

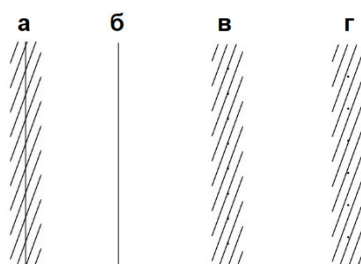


Рис. 1. Примеры использованных в экспериментах изображений:

- а — иллюзия Цольнера (вертикальная линия воспринимается как наклонная);
б — как тестовая, так и референтная линия; в, г — интерполируемые изображения из 8 и 6 точек со штрихами

Получены оценки ориентации для всех разновидностей стимулов. На рис. 2 показан фрагмент данных одного из наблюдателей для вертикальной (90°) ориентации.

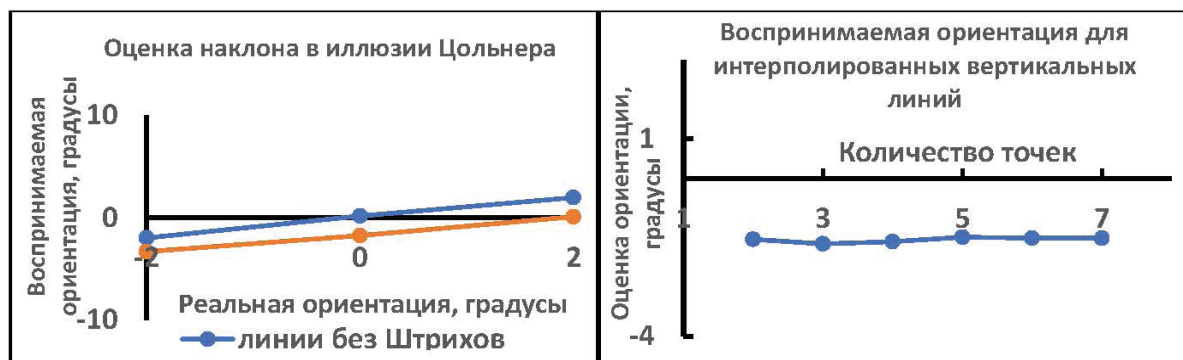


Рис. 2. Оценки ориентации для реальных и интерполированных линий.
Указана разница между реальной ориентацией и вертикалью (90°)

Ориентация линий оценивается без искажений в случае отсутствия штрихов (рис. 2, кривая «без штрихов»). Одинаковые искажения получены для линий и точечных изображений. В среднем для всех наблюдателей иллюзия в вертикальной ориентации была равна $1,36^\circ$, для ориентации в 45° — $3,5^\circ$. Полученные данные сравнили с искажениями, выявленными в иллюзии наклона, возникающей при добавлении к одной линии дополнительной линии с другой ориентацией. Результаты оказались сопоставимыми, что свидетельствует о том, что добавление аналогичных периодических элементов в изображение не увеличивает иллюзию Цольнера и она является прямым следствием иллюзии наклона. Известно, что интерполяция осуществляется на довольно высоких уровнях зрительной системы. Результаты свидетельствуют также о проявлении иллюзий наклона и Цольнера на высоком уровне и об их влиянии на интерполяцию.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ В МЕДИАСИСТЕМАХ: ВЗАИМНОЕ ВЛИЯНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ КАК СТИМУЛОВ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

К. Ф. Гласман, Е. Н. Гриненко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
email: k.glasman@gmail.com

Аннотация. В работе показано, что сложившиеся на практике кинематографа и телевидения нормы на коэффициент контрастности «гамма» систем обусловлены обменом интенсивностей ощущения резкости и контрастности изображения медиасистемы. Увеличение коэффициента контрастности «гамма» медиасистем до значений, превышающих единичную величину, делает изображение визуально более резким и повышает интегральное качество впечатления, несмотря на некоторое ухудшение тоновоспроизведения в области темных тонов. Компенсация уменьшения остроты зрения при сравнительно малой яркости адаптации путем частотно-зависимой гомоморфной фильтрации делает целесообразным уменьшение градиента кривой тоновоспроизведения «гамма» на 20–40 процентов, что заметно улучшает качество впечатления зрителя.

При проектировании медиасистем и оптимизации их параметров необходим критерий качества получаемого человеком впечатления об изображении, который функционально связан с характеристиками разрабатываемых систем. Аргументами функционала — критерия оптимальности являются векторные параметры — стимулы зрительного анализатора, они включают в себя: размер, формат, яркость, контраст, четкость, резкость, воспроизведение контуров, воспроизведение полутонов, равномерность и чистоту фона, мелькание и др. Эти стимулы могут характеризоваться признаками второго рода, количество и формат которых определяется свойствами составных частей мультимедийной системы и канала связи. Например, контраст определяется динамическим диапазоном и числом уровней квантования, четкость определяется частотой дискретизации (числом отсчетов), резкость определяется формой амплитудно-частотной характеристики системы, равномерность и чистота фона определяется флуктуационными шумами, шумами квантования, артефактами компрессии видеоданных, воспроизведение полутонов определяется градационными характеристиками и показателем «гамма» элементов системы. Характерным свойством параметров является взаимная зависимость и взаимное влияние. Например, можно отметить пары: контраст — резкость, четкость — резкость, резкость — воспроизведение полутонов и др. Решение задач оптимизации канала изображения медиасистемы по совокупности параметров является весьма сложным и малоизученным, поскольку аргументами функционала — критерия оптимальности являются векторы с взаимозависимыми составляющими. Поэтому оценка взаимной зависимости и взаимного влияния оптимальных параметров изображения как стимулов зрительного анализатора является важной и актуальной задачей.

Основным объектом исследования в работе является изучение обменных соотношений между ощущениями резкости и контрастности изображения. Исследования показали: когда зрители рассматривают типичные для телевидения и кино изображения, они предпочитают изображения, полученные при значении градиента кривой тоновоспроизведения «гамма», превышающем единицу. Когда они имеют возможность регулировать коэффициент «гамма», они увеличивают его для улучшения качества впечатления. Чем меньше яркость фона, окружающего рассматриваемое изображение и определяющего общую яркость адаптации зрительного анализатора, тем более за-

метен этот эффект. И это происходит несмотря на то, что при большем коэффициенте «гамма» происходит ухудшение тоновоспроизведения, особенно заметное в области темно-серых и черных тонов и проявляющееся в виде «сжатия» темно-серых и черных крупных деталей изображения.

Типичные для телевидения и кино изображения почти всегда имеют яркость, меньшую яркости изображаемого объекта. И яркость адаптации, при которой наблюдаются изображения, обычно меньше яркости адаптации, при которой наблюдаются объекты наблюдения. Известно, что с уменьшением яркости адаптации снижается различительная способность к малым деталям, т.е. ухудшается острота зрения. Была выдвинута гипотеза: увеличение коэффициента контрастности, желательное для улучшения качества, обусловлено обменом интенсивностей ощущения резкости и контрастности изображения. Увеличение коэффициента контрастности «гамма» медиасистемы и контраста изображения делает изображение визуальное более резким, компенсируя ухудшение остроты зрения и делая качество впечатления более высоким, несмотря на некоторое ухудшение тоновоспроизведения в области темных тонов. Компенсация уменьшения остроты зрения путем частотно-зависимой гомоморфной фильтрации сделает целесообразным уменьшение градиента кривой тоновоспроизведения «гамма», что улучшит качество впечатления зрителя.

Для проверки гипотезы было проведено две серии экспериментальных исследований. Привлечение для участия в эксперименте группы обычных наблюдателей-«зрителей» позволило доказать существование эффекта воздействия частотно-зависимой гомоморфной фильтрации изображения на величину оптимального градиента кривой тоновоспроизведения. Привлечение для участия в эксперименте группы «экспертов» позволило установить количественные соотношения для предпочтительных значений градиента в зависимости от условий наблюдения, детальности и тональности сюжетов и т. п. Компенсация уменьшения остроты зрения путем частотно-зависимой гомоморфной фильтрации делает целесообразным уменьшение градиента кривой тоновоспроизведения «гамма» на 20–40 процентов, что заметно улучшает качество впечатления зрителя.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ШКАЛЫ ОТНОШЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕДИАСИСТЕМ

К. Ф. Гласман, Е. Н. Гриненко

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
email: k.glasman@gmail.com

Аннотация. Для решения задач оптимизации медиасистем желательно иметь критерий оптимизации, который представляет собой оценку качества впечатления. Качество впечатления — величина, измеряемая на основе субъективных экспертиз. Важным аспектом при проведении таких экспертиз является выбор эталона измерения, то есть выбор шкалы и определение ее свойств. Многие шкалы, предложенные в Рекомендациях, которые разработаны Международным союзом электросвязи (МСЭ), являются порядковыми шкалами. Но для возможности использовать полученные в ходе проведения субъективных экспертиз результаты для решения задач оптимизации необходимо иметь шкалу, обладающую свойствами шкалы интервалов или, что более предпочтительно, шкалы отношений. В работе предложена шкала ухудшений, обладающая свойствами шкал отношений и построенная с использованием метода Терстоуна.

Для решения задач оптимизации медиасистем желательно иметь критерий оптимизации, который представляет собой оценку качества впечатления. Качество впечатления — величина, измеряемая на основе субъективных экспертиз. Важным аспектом при проведении таких экспертиз является выбор эталона измерения, то есть выбор шкалы и определение ее свойств. Многие шкалы, предложенные в Рекомендациях, являются порядковыми шкалами. Числа на таких шкалах являются рангами, позволяющими упорядочить значения измеряемого качества. Но для возможности использовать полученные в ходе проведения субъективных экспертиз результаты для решения задач оптимизации необходимо иметь шкалу, обладающую свойствами шкалы интервалов или, что более предпочтительно, шкалы отношений.

Для построения шкалы ухудшений, обладающей свойствами шкал интервалов или отношений, был использован метод Терстоуна. Экспертам было предложено 11 суждений — категорий в диапазоне от «Искажения предельно раздражают» до «Искажения незаметны», которые необходимо было расположить на вертикальной линии — графической шкале с двумя опорными точками А и Е: верхняя точка (А) — «Искажений нет», нижняя точка (Е) — «Искажения абсолютно неприемлемы» (нулевая точка шкалы). На шкале на равных интервалах друг от друга нанесены 6 отметок, обозначенных буквами от А до Е. Цель эксперимента по методу Терстоуна — определить те суждения, которые будут расположены экспертами на делениях шкалы, находящихся на равных интервалах друг от друга. Если такие суждения будут найдены, то они определяют шкалу качества, обладающую свойствами шкалы интервалов. Если среди равноинтервальных суждений будет найдено суждение, которое располагается в нулевой точке Е шкалы, то выбранное подмножество суждений определит шкалу качества, обладающую свойствами шкалы отношений.

В психофизической экспертизе в качестве экспертов участвовало 117 студентов СПбГУКиТ. Статистическая обработка данных эксперимента показала, что шкала ухудшений, построенная на основе суждений: С1 (Искажения незаметны), С3 (Искажения немного заметны, но не мешают), С5 (Искажения слегка мешают), С7 (Искажения мешают и раздражают), С9 (Искажения очень сильно раздражают), С11 (Искажения предельно раздражают), обладает свойствами шкалы отношений. Эквивалентами суждений С1, С3, С5, С7, С9, С11 являются числа 5, 4, 3, 2, 1, 0, с которыми можно выполнять все математические операции. Шкала может быть рекомендована для использования в исследованиях и оценках уровня качества медиасистем.

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И. Е. Гусаров^{1, 2}, Д. Н. Кочурова^{1, 2}, А. И. Калугин¹, Е. А. Антонов¹, М. Ю. Альес¹

¹ ФГБУН «Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН»

² ФБГОУ ВО «Ижевский государственный технический университет

им. М. Т. Калашникова»

e-mail: gusarovie@udman.ru

Аннотация. В работе представлен метод обнаружения летательных объектов, основанный на двухэтапной классификации мультиспектральных изображений с помощью искусственных нейронных сетей.

В настоящее время актуальной проблемой является контроль и обнаружение летательных объектов, таких как птицы, беспилотные летательные аппараты самолетного и вертолетного типов в воздушном пространстве гражданских аэродромов во избежание столкновения с воздушными транспортными средствами.

Предложен метод обнаружения летательных объектов на основе мультиспектральной съемки с применением искусственных нейронных сетей для классификации результатов съемки. Анализ мультиспектральных изображений предлагается провести в два этапа. На первом этапе из каждого монохромного слоя мультиспектрального изображения извлекаются пространственные особенности летательных объектов. Этот этап реализован на основе нейросети YOLOv7 [1]. Тренировочный набор изображений составлен как из собственных данных, полученных с помощью мультиспектральной камеры в ближнем ИК и видимом диапазонах, так и из изображений, размещенных в сети Интернет в свободном доступе. Тренировочные данные из более 40 000 изображений, на которых расположено от 1 до 40 различных объектов, были дополнительно инвертированы и зеркально отображены. В результате получен набор из 200 000 обучающих изображений. Произведена аннотация этих изображений в формате YOLO. Скорректирована нейронная сеть для анализа монохромных изображений.

В ходе выполнения первого этапа выделяются области изображений с возможным присутствием летательного объекта. На втором этапе выполняется анализ этих областей с целью выделения спектральных особенностей объектов [2] и распознавания типа объекта. Такой анализ позволяет различать объекты искусственного и естественного происхождения, а также выявлять мелкоразмерные объекты, у которых сложно выделить пространственные характеристики.

Литература

1. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver Canada, 2023. P.7464–7475.
2. Альес М. Ю., Антонов Е. А., Калугин А. И., Зарипов М. Р. Применение искусственных нейронных сетей для анализа мультиспектральных изображений // Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 8. С. 48–53.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ В ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАФИИ

А. Ю. Жданов^{1, 2}, В. А. Рыжова¹

¹ Университет ИТМО

² Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
e-mail: artemichzdanov@gmail.com

Аннотация. В данной работе предлагается использовать пространственную линейно ограниченную фильтрацию в решении обратной задачи ЭЭГ для снижения погрешности локализации и пространственного распределения локализованного сигнала [1].

На сегодняшний день недостатком исследований в области локализации нейронной активности методом решения обратной задачи электроэнцефалографии является низкое пространственное разрешение метода, выражаемое в высокой погрешности локализации сигнала и его пространственном распределении. В данной работе предлагается использование линейно ограниченной пространственной фильтрации на основе априорной информации об активности источников.

Влияние пространственной фильтрации на функцию погрешности локализации представлено на рис. 1.

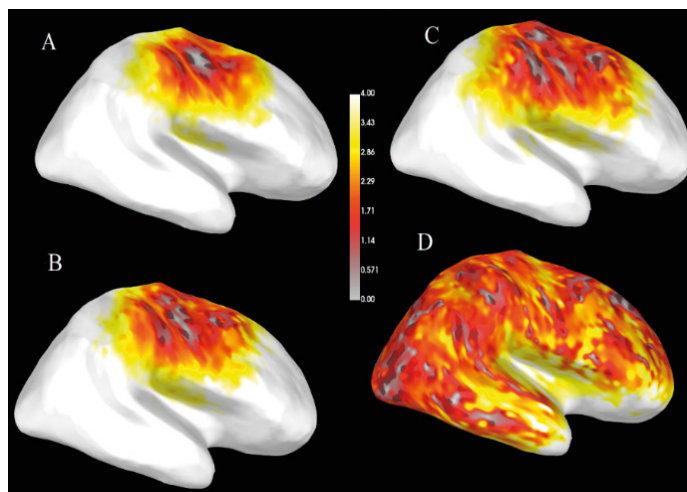


Рис. 1. Результаты расчетов погрешности локализации при размере радиуса зоны интереса в пространственной фильтрации 5, 10, 15, 20 мм

В результате реализации пространственной фильтрации удалось улучшить метрики пространственного распределения сигнала и погрешности локализации на 50 %.

Литература

1. *Hauk O., Stenroos M., Treder M.S.* Towards an objective evaluation of EEG/MEG source estimation methods. The linear approach // *Neuroimage*. 2022. Jul 15. No. 255. P. 119177 [Epub 2022 Apr 4. PMID: 35390459].

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ БИНАРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ФАЗОВО-КОНТРАСТНЫХ СНИМКОВ КЛЕТОК НЕРВНОЙ ТКАНИ

*Д. А. Илюхин¹, В. О. Ячная^{1, 2}, Р. О. Малашин^{1, 2}, М. К. Ермаченкова¹,
А. В. Волков^{3, 4}, С. Г. Пашкевич⁴, А. А. Денисов^{3, 4}*

¹ Институт физиологии имени И. П. Павлова РАН

² Государственный университет аэрокосмического приборостроения

³ Белорусский государственный университет

⁴ Институт физиологии НАН Беларуси

e-mail: malashinroman@infran.ru

Аннотация. Проведено исследование, целью которого было сравнить различные модели нейронных сетей в задаче бинарной сегментации глиомных клеток. Данное исследование направлено на повышение точности и скорости анализа роста клеточных культур.

Актуальность. Хотя анализ медицинских изображений, включая сегментацию микроскопических снимков клеток, активно развивается, специализированные системы для обработки фазово-контрастных изображений клеток глиомы С6 пока не были созданы. Это подчеркивает необходимость адаптации и тестирования существующих методов на этих данных, что открывает перспективы для научных исследований и способствует созданию эффективных решений для неинвазивного анализа клеточных культур.

Методы. В данном проекте была использована модифицированная версия архитектуры U-Net, которая показала высокую эффективность в задачах сегментации изображений. Исследованная архитектура позволяет интегрировать различные предварительно обученные на ImageNet модели-классификаторы в качестве энкодера, что повышает гибкость и потенциал модели для работы с новыми данными.

Для обучения и тестирования моделей нейронных сетей использовались базы данных (БД) LiveCell [1] и собранная база данных клеток нервной ткани. Для оценки результатов моделей была использована метрика Dice Score.

Результаты. Был проведен анализ энкодеров для UNet [2, 3], в котором участвовало 16 различных моделей-классификаторов. Тестирование велось на БД LiveCell и собранной БД. По результатам данного тестирования были выбраны две архитектуры UNet-VGG19 [4] и UNet-MiT-B3 [5]. Первая выбрана за счет лучших значений метрики Dice Score на БД LiveCell, а вторая — так как была единственной архитектурой, выдавшей удовлетворительные результаты при zero-shot learning тестировании на собранной БД. Также была проведена оценка значимости предобученных весов у выбранных архитектур на собранной базе данных.

Литература

1. Edlund C., Jackson T. R., Khalid N. et al. LIVECell — A large-scale dataset for label-free live cell segmentation // Nat Methods. 2021. No. 18. P. 1038–1045.
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. 2015. No. 9351. P. 234–241.
3. Iglovikov V., Shvets A. Terausnet: U-net with vgg11 encoder pre-trained on imagenet for image segmentation. arXiv preprint, 2018. P. 1–5.

4. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. arXiv preprint, 2014. P. 1–14.
5. *Xie E. et al.* SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers // Advances in neural information processing systems. 2021. No. 34. P. 12077–12090.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИСТАГМОГРАФИИ ДЛЯ ОБЪЕКТИВНОЙ ВИЗОМЕТРИИ

С. А. Коскин

ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия им. С. М. Кирова» МО РФ,
Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
e-mail: eyemillennium@mail.ru

Аннотация. В этой работе представлен обзор современных методов объективной визометрии на основе регистрации индукции и супрессии нистагма, а также метода предпочтительного разглядывания.

Острота зрения — это основная функция органа зрения, и ее объективное определение является одним из наиболее важных функциональных исследований во врачебной и экспертной практике. С начала XX века возрос интерес к нистагмографии как методу регистрации оптокинетического нистагма, которому посвящено достаточно большое количество работ, подтверждающих ее информативность при объективном исследовании остроты зрения. Оптокинетический нистагм (ОКН) — нистагм, возникающий при фиксации взора на быстро движущихся в одну сторону предметах, впервые был описан в 1825 г. I. Purkinje у лиц, наблюдавших за кавалерийским парадом.

При ОКН движения глаз регистрировали посредством визуального наблюдения, что позволяло оценивать только макродвижения. Впоследствии для более детального изучения стали применять различные оптические приборы, затем были разработаны методы, основанные на механической регистрации движения глаз, однако они не приобрели широкого распространения из-за инвазивности. Использование методов фото- и киносъемки оказалось непригодными для оценки микродвижений глаз. Результаты, полученные позднее с помощью электроокулографии, не всегда были достоверными и имели большой разброс. В дальнейшем последовали попытки использовать методы фото- и видеорегистрации роговичного блика, а затем был применен усовершенствованный фотоэлектронный метод. По убеждению ряда авторов, основным недостатком всех вышеперечисленных методов является возможность оценки только монокулярных движений глаз, каждый из них обладает различными техническими возможностями и может применяться в зависимости от поставленных задач. Еще в 1922 году J. Ohm указал на возможность использования ОКН для объективного определения остроты зрения, и с тех пор актуальным является выбор точного метода регистрации движений глаз.

Развитие компьютерных технологий позволило пополнить арсенал офтальмолога новыми информативными, неинвазивными и простыми в применении методами окулографии, одним из которых является инфракрасная видеоокулография (ИКВОВГ), позволяющая очень точно и бесконтактно регистрировать движения глаз, а затем в виде цифровых значений определять положение взора относительно тест-объекта на экране монитора. Данные приборы учитывают среднюю продолжительность и позиции фиксации, частоту и продолжительность морганий, амплитуду и латентность саккад. Направления движений взора определяются на основании изменений положения вектора, идущего от центра зрачка к центру роговичного блика. По данным последних исследований, наиболее перспективными при проведении объективной визометрии являются методы индукции и супрессии нистагма, а также метод предпочтительного разглядывания [1–3].

При сравнении субъективных показателей остроты зрения с результатами, полученными с помощью метода индукции и супрессии ОКН, прослеживается четкая зави-

симость между объективными и субъективными показателями остроты зрения. В результате проведенного статистического анализа были получены показатели силы корреляционной связи для каждого разработанного метода (от 0,76 до 0,92), при сравнении с величинами остроты зрения по данным субъективной визометрии. Разработанный с применением инфракрасной видеоокулографии метод объективной визометрии на основе индукции оптокинетического нистагма был более информативен в диапазоне остроты зрения от 0,01 до 0,1 (чувствительность — 87 %, специфичность — 62 %), а на основе супрессии — в диапазоне от 0,2 до 1,0 (чувствительность — 90 %, специфичность — 57 %).

При применении данных методов результаты визометрии не зависят от ответов испытуемых, а применение современных высокочастотных инфракрасных видеонистагмографов позволяет повысить точность проводимых измерений.

Вывод. Использование современных видеонистагмографов позволяет не только провести математическую обработку полученных данных и сопоставить результаты с традиционной визометрией, но и получить массив данных для последующей обработки с использованием возможностей искусственного интеллекта.

Литература

1. Ковальская А.А., Коскин С.А., Бойко Э.В., Шелепин Ю.Е. Объективное исследование остроты зрения методом предпочтительного разглядывания на основе инфракрасной видеоокулографии в целях врачебной экспертизы // Современная оптометрия. 2013. № 2(62). С. 34–38.
2. Ковальская А.А., Коскин С.А., Бойко Э.В., Шелепин Ю.Е. Объективное исследование остроты зрения на основе регистрации оптокинетического нистагма с помощью инфракрасной видеоокулографии в целях врачебной экспертизы // Современная оптометрия. 2013. № 3(63). С. 27–33.
3. Ковальская А.А. Диагностические возможности инфракрасной видеоокулографии в офтальмологии: автореф. дисс. ... канд. мед. наук. СПб, 2013. 26 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОБУЧЕНИЯ УЗКОСПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ КОНФИГУРИРУЕМЫХ СИСТЕМ АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Р. О. Малашин

Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
e-mail: malashinroman@infran.ru

Аннотация. В работе проведено исследование динамики обучения узкоспециализированных нейронных сетей для формирования динамически конфигурируемых систем анализа изображений, а также приведены результаты экспериментов с нейронными сетями разных архитектур.

Системы с использованием динамических вычислений полезны, когда для разных входных данных требуется выполнять различные вычисления. Такая необходимость естественным образом вытекает, например, при ограниченных вычислительных ресурсах, когда для простых примеров можно использовать менее ресурсоемкие алгоритмы. С динамической конфигурацией тесно связано важное понятие эволюционной биологии — модульность. Система считается модульной, если она может быть разделена на несколько множеств компонентов с сильным взаимодействием внутри множеств и слабым между ними. Автоматическое формирование изолированных модулей внутри современных искусственных нейронных сетей при использовании классической парадигмы обучения может быть затруднено, поэтому становится необходимым использование дополнительных способов, обеспечивающих модульность нейронной сети [1]. В данной работе исследуются нейронные сети с точки зрения возможности создания ансамбля нейронных сетей за счет сужения пространства распознаваемых классов для отдельных нейронных сетей-специалистов [2]. Архитектуры, построенные по такому принципу, часто связывают со смесью экспертов [3]. В этой работе вместо одного обучается серия классификаторов и детекторов, каждый из которых ответственен лишь за часть распознаваемых образов. Приведены результаты экспериментов с нейронными сетями разных архитектур [4–6]. Показано, что при удачном подборе гиперпараметров возможно повышение свойств отдельных нейронных сетей-экспертов, работающих независимо от других модулей. При этом, однако, констатируется, что рассматриваемый прирост является сравнительно небольшим, и ключевым становится переиспользование признаков, сформированных на всем пространстве распознаваемых образов.

Для обеспечения максимального качества работы специалистов можно выделить две фазы обучения:

- формирование общих признаков при решении более широкой задачи;
- дистилляция задачи, заключающаяся в забывании признаков, не присутствующих в более узком пространстве образов.

Полученные результаты помогают лучше понять свойства динамически конфигурируемых систем для распознавания зрительных образов.

Литература

1. *Mendez J. A., Eaton E.* How to reuse and compose knowledge for a lifetime of tasks: A survey on continual learning and functional composition // arXiv preprint arXiv:2207.07730. 2022.

2. *Hinton G., Vinyals O., Dean J.* Distilling the knowledge in a neural network // arXiv preprint arXiv:1503.02531. 2015.
3. *Shazeer N., Mirhoseini A., Maziarz K., Davis A., Le Q., Hinton G., Dean J.* Outrageously large neural networks: The sparsely-gated mixture-of-experts layer // arXiv preprint arXiv:1701.06538. 2017.
4. *Howard A., Sandler M., Chu G., Chen L.-C., Chen B., Tan M., Wang W., Zhu Y., Pang R., Vasudevan V., Le Q. V., Adam H.* Searching for mobilenetv3 // Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. Seoul, South Korea, 2019. P. 1314–1324.
5. *Bochkovskiy A., Wang C.-Y., Liao H.-Y. M.* Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection // arXiv preprint arXiv:2004.10934. 2020.
6. *He K., Zhang X., Ren S., Sun J.* Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Las Vegas, USA, 2016. P. 770–778.

ДИАПАЗОН ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА: СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ

В. Л. Смирнов, Л. Н. Архипова

АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова»
e-mail: VladimirL.Smirnov@yandex.ru

Аннотация. Излагается структурная точка зрения на цветовой диапазон $\lambda \approx 380\text{--}760$ нм, которая отличается от принятой — ориентированной на цветовой круг; λ — длина волны видимого спектра. Она позволяет по этапам проследить его эволюцию (развертывание) от зарождения до текущего состояния. Методика и результаты представлены на рис. 1.

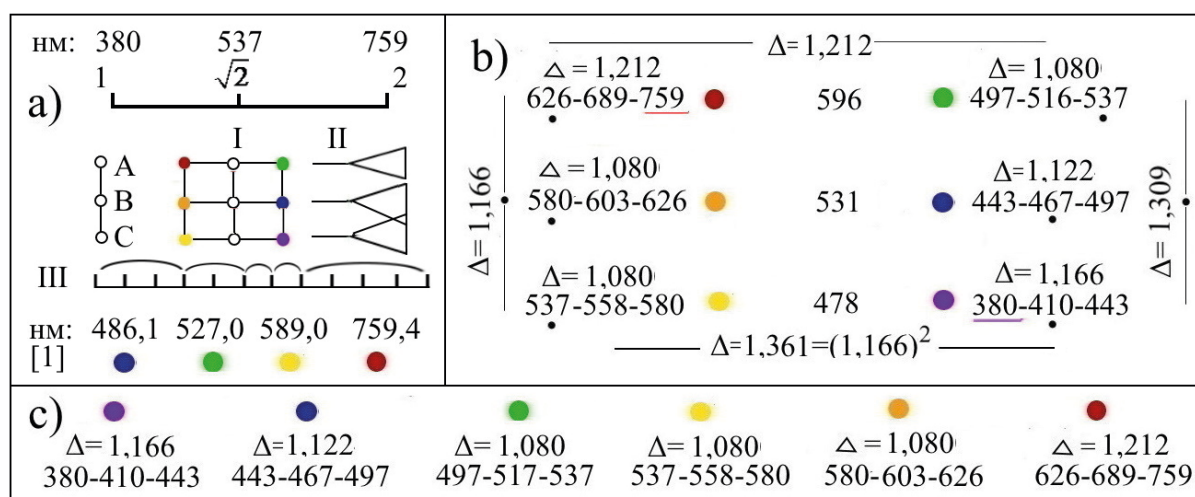


Рис. 1. Структура диапазона цветового зрения человека. Методика и результаты

Структура диапазона трактуется как система отношений и рассматривается как сеть, которая состоит из узлов — разрешенных состояний, а также их связей — правил, ответственных за устойчивость. Основное допущение сводится к тому, что существует абстрактная структура, которая эволюционирует по своим законам, а реальная структура детерминирована. Структурный подход ориентирован на междисциплинарность и исключение специфики конкретного объекта исследования. Согласно позиции а) структура состоит из триад вида $A-B-C$, где A и C представляют собой оппозицию, а в B демонстрируется их совместимость; $\Delta = C/A$. В качестве оппозиции выступают геометрическая и арифметическая пропорции, а также золотое сечение отрезка в двух направлениях. Сценарий — последовательность структурных событий разворачивается как в пределах единичного отрезка числовой оси, так и в пределах мини-комплекса — конструкции, которая состоит из шести триад. За счет исходного выбора $\lambda = 537$ нм сценарий построен так, что позиции на числовой оси могут читаться и как узлы структуры, и как длины волн, которые выделены цветными метками. Процедура является поисковой и разворачивается в три этапа, на каждом из которых реализуется свой вариант порядка, т. е. формируются однотипные отношения. Постоянно учитывается предыстория.

На этапе I мини-комплекс заполняется путем согласования названных вариантов пропорций, при этом его узлы трактуются как каркас диапазона — первичные цветовые «окна». **На этапе II** узлы каркаса расщепляются, т. е. система переходит от дискретности к непрерывности, что приводит не только к заполнению почти всего диапазона, но и к ряду дефектов (наложение, неосвоенные участки). Здесь демонстриру-

ется совместимость исходного выбора 537 нм с четырьмя известными [1] линиями на Солнце и в земной атмосфере. **На этапе III** преодолеваются дефекты этапа II за счет выбора повторяющихся отрезков (структурных оснований), на которых строятся расщепления. Результаты на основе каркаса представлены в позиции b), а на числовой оси — в позиции c).

Литература

1. Вавилов С. И. Глаз и Солнце. М.: Амфора, 2006. 334 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГРАММЫ МАКЛЕОДА — БОЙНТОНА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ ЧЕЛОВЕКА

С. К. Стафеев^{1, 2}, Д. Д. Шаров^{1, 2}

¹ Институт когнитивных исследований СПбГУ

² Университет ИТМО

e-mail: stafeevs@yahoo.com

Аннотация. В данной работе рассматривается исследование проблемы несоответствия красно-зеленой и сине-желтой феноменологических осей цветового пространства человека цветовым оппонентным каналам, существование которых было показано на первичных стадиях обработки сигналов в зрительной системе приматов. Для ее исследования, а также для обсуждения ряда других вопросов в данной работе подробно рассматриваются перспективные примеры использования диаграммы МакЛеода — Бойнтонна.

Известно, что цветовое зрение человека основано на сравнении количества фотонов, поглощаемых тремя типами колбочек, однако процессы, лежащие в основе цветовосприятия на пострецепторных стадиях, до сих пор остаются недостаточно изученными. Одна из основных проблем — несоответствие красно-зеленой и сине-желтой феноменологических осей цветового пространства человека цветовым оппонентным каналам, существование которых было показано на первичных стадиях обработки сигналов в зрительной системе приматов. На первичных стадиях различение цветов зависит от двух оппонентных сигналов: отношение сигналов, поступающих от L-колбочек и от M-колбочек; второй хроматический сигнал представляет отношение сигналов, поступающих от S-колбочек и комбинации сигналов от L- и M-колбочек. Эти два нейронных канала соответствуют горизонтальной и вертикальной осям диаграммы цветности МакЛеода — Бойнтонна, в настоящее время широко используемой для представления диапазона цветов, которые различает зрительная система человека.

Диаграмма с успехом применяется для самых различных исследований. Здесь и эксперименты, направленные на исследование возможности сравнения стимулов, предъявляемые на короткое время в разных участках поля зрения и на разном расстоянии друг от друга как в парафовеа, так и в фовеальной области, и определение цветности неизвестного источника по пересечению линий на диаграмме, отвечающих цветностям поверхностей разного наклона. Знаменитая линия тритана человека определяется как вертикальная прямая в осях МакЛеода — Бойнтонна, а изменение концентрации макулярного пигмента выражается на этой диаграмме как вращение точек цветности вокруг точки источника. Кроме того, если на эту диаграмму нанести результаты измерений, цветности сцен с комбинированным освещением (прямые солнечные лучи плюс рассеянный цвет неба), они ложатся на прямую, соединяющую уникальный желтый и уникальный синий цвета. Наконец, линия оптимального цветоразличения на диаграмме цветности МакЛеода — Бойнтонна проходит наклонно, с отрицательным наклоном. Эти и другие перспективные примеры использования диаграммы подробно обсуждаются в настоящем сообщении.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРЫ ГОЛОВНОГО МОЗГА И РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ — КОМПЬЮТЕР

Р. Д. Хлынов, В. А. Рыжова

Университет ИТМО
e-mail: ruslan384ruslan3@gmail.com

Аннотация. В работе исследуется применение функциональной ближней инфракрасной спектроскопии (фБИКС) для анализа активности головного мозга и разработки интерфейсов мозг — компьютер. Исследованы перспективы комбинирования фБИКС с другими методами нейровизуализации для улучшения диагностики различных заболеваний и понимания мозговых процессов.

В настоящее время церебральная оксигенация и гемодинамика оцениваются с использованием различных методов нейровизуализации. По сравнению с другими методами нейровизуализации наиболее перспективным методом исследования активности мозга является функциональная ближняя инфракрасная спектроскопия (фБИКС) благодаря пространственному разрешению около 1 мм (наравне с фМРТ), временному разрешению 200 мс (высокому по сравнению с фМРТ и низкому по сравнению с ЭЭГ), удобству в использовании, регистрации в реальном времени и возможности участников двигаться без риска для безопасности во время исследования [1].

Отличным примером применения нейровизуализации, которая требует портативности систем, высокого разрешения и информативности, является технология интерфейса мозг — компьютер (ИМК). Системы ИМК классифицируются на несколько типов в зависимости от функциональных систем визуализации, с которыми они взаимодействуют, такие как ЭЭГ-ИМК, фМРТ-ИМК и фБИКС-ИМК [2].

Однако актуальным направлением исследования является расширение технологии фБИКС-ИМК путем комбинирования ее не только с другими методами нейровизуализации, но и с методами измерения пульсовых колебаний и реологических параметров крови, что позволяет получать более полное и точное представление о биологических процессах [3]. Установлено, что дополнительное использование для этого спектральных, поляризационных и других оптико-электронных методов позволяет не только получить более полную информацию о структуре и активности головного мозга (методом фБИКС), но и проводить калибровочные и измерительные процедуры, используя единую методологическую базу для обработки сигналов от оптико-электронных аппаратных средств.

Литература

1. *Taheri S., Ezoji M., Sakhaei S. M.* Convolutional neural network based features for motor imagery EEG signals classification in brain — computer interface system // *SN Applied Sciences*. 2020. No. 2. P. 1–12.
2. *Paulmurugan K., Vijayaragavan V., Ghosh S., Padmanabhan P., Gulyás B.* Brain —computer interfacing using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) // *Biosensors*. 2021. No. 11(10). P. 389.
3. *Jeong E., Seo M., Kim K. S.* Design of an fNIRS-EEG hybrid terminal for wearable BCI systems // *Review of Scientific Instruments*. 2024. No. 95. P. 085001.

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖЕНИЙ ГЛАЗ И НАПРАВЛЕНИЯ ВЗОРА

Е. Ю. Шелепин

Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН
e-mail: sey2@yandex.ru

Аннотация. Разработаны алгоритмы автоматического определения по данным видеорегистрации таких важнейших характеристик движений глаз, как скорость и амплитуда саккад, длительность и направления фиксации взора. Алгоритм определяет центр зрачка и блика ИК-источника в кадре. Создан высокоточный и производительный метод, использован нейросетевой подход (библиотека PyTorch языка программирования Python).

Проведено обучение алгоритма на основе проведенных ранее собственных обширных исследований, при разных условиях естественного и искусственного освещения, широкого возрастного диапазона испытуемых, с разнообразными анатомическими характеристиками глаз, что обеспечивает высокую адаптивность и универсальность алгоритма в различных условиях применения. Разработанный алгоритм позволяет находить положение глаз в кадре, сегментировать радужки, определять положения зрачков и бликов, оценивать направления взгляда и преобразовывать координаты из системы камеры в систему дисплея. Конечным результатом работы алгоритма являются координаты взгляда относительно размеров монитора. Предложенный алгоритм может применяться при конструировании высокоточных систем отслеживания движения глаз для научных и практических целей. Алгоритм применен для аппаратно-программного комплекса «Нейробюро» для психофизиологических исследований. Было показано, что программисты в процессе накопления профессионального опыта вырабатывают эффективные стратегии движения глаз, характеризующиеся фрагментацией кода на аналитически значимые единицы. Более опытные программисты демонстрируют меньше фиксации, более короткие пути сканирования (микросаккады, тремор) и саккады с большой амплитудой, отражающие перевод взора на различные участки сцены. Наблюдалось увеличение скорости саккад при больших поисковых движениях, что коррелировало с профессиональным мастерством в задачах объяснения кода. Было выявлено, что обнаружение ошибок при визуальном поиске в первую очередь зависит от распознавания деталей текста, которое полагается на семантику и грамматику языка программирования. Это отличается от обработки естественных сцен или текстов на естественных языках. Было отмечено, что профессиональный опыт снижает усилия, необходимые для такой деятельности [1, 2].

В заключение подчеркнем, что разработанный алгоритм показал, как профессиональный опыт формирует стратегии макро- и микродвижений глаз при анализе исходного кода. Показаны его отличия от чтения естественного языка. Эти результаты могут помочь в разработке нейроморфных алгоритмов для генерации и исправления кода, для автоматизированной оценки профессионального мастерства.

Литература

1. *Shelepin E.* Eye tracking in expertise assessment case studies // 24 Annual meeting of the Vision Sciences Society. May 17–22, 2024. St. Pete Beach, Florida. Abstracts, p. 154–155 [Электронный ресурс]. URL: https://www.visionsciences.org/documents/VSS_2024_Abstracts.pdf. (дата обращения: 24.10.2024).
2. *Шелепин Е. Ю., Скуратова К. А., Лехницкая П. А., Шелепин К. Ю.* Определение координат центров зрачков и бликов в кадре: нейросетевой подход // Оптический журнал (в печати).

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ЗНАЧЕНИЕМ ФУНКЦИИ МОДУЛЯЦИИ ЛОКАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТУРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В ДАННОЙ ТОЧКЕ И ВЕРОЯТНОСТЬЮ ФИКСАЦИИ ВЗОРА НА НЕЙ

Д. В. Явна, В. В. Бабенко

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»
e-mail: yavna@fortran.su

Аннотация. Описываются организация, ход и результаты окулографического исследования, прямо проверяющего гипотезу о связи мгновенного значения функции модуляции локальной характеристики изображения (контраст, ориентация и пространственная частота (ПЧ) градиента яркости) в данной точке и вероятностью глазодвигательной фиксации на ней как объективного индикатора привлечения явного внимания.

Стимулы представляли собой пространственно модулированные текстуры. Текстура несущая стимула задавалась двумерной функцией Габора, θ которой могла равняться либо 0, либо 180 град. для каждой ориентации огибающей (здесь и далее обозначения даны по [1]). Наклон огибающей варьировался. Габоровские микропаттерны суммировались в случайных позициях с ограничением на минимальное расстояние между центрами по методу, описанному в [2]. Модуляция была синусоидальной 3 ц./изобр.; чтобы снизить влияние систематической ошибки, связанной с привлечением внимания к центру (напр., [3]), при создании каждого стимула вводился случайный фазовый сдвиг модулирующей функции. Значение функции модуляции контраста задавало величину контраста габоровского микропаттерна в данной точке относительно среднего; значения функции модуляции ориентации и пространственной частоты в данной точке кодировали изменения базовых значений θ и λ соответственно. Яркости пикселей при нулевом уровне модуляции контраста лежали в диапазоне от 50 до 180 кд/м². Средняя яркость текстур составляла около 105 кд/м², такой же была яркость фона. Некоторые из стимульных изображений с поясняющими подписями приведены на рис. 1.

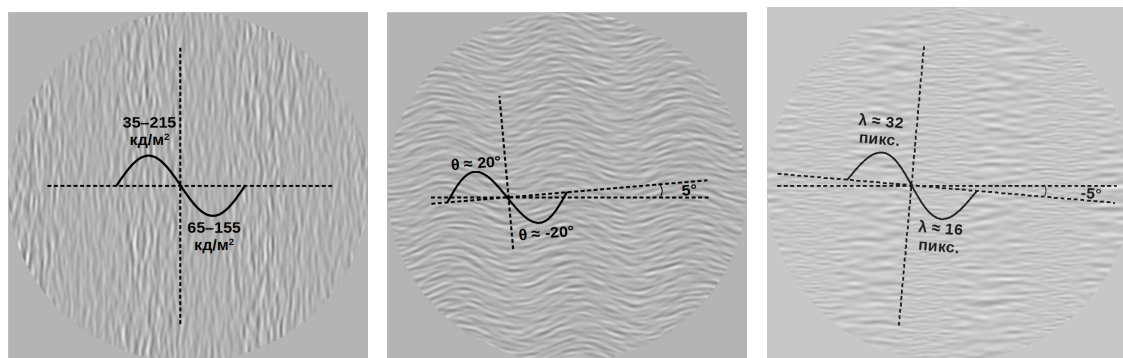


Рис. 1. Примеры использованных стимулов с разными ориентациями несущей и огибающей.
Слева направо: модуляция контраста, ориентации, ПЧ

В исследовании приняли участие 32 здоровых испытуемых с нормальным или корригируемым до нормы зрением. Регистрация движений глаз осуществлялась трекером SMI Red-m на частоте опроса 60 Гц. Использовалась стандартная пятиточечная калибровка. Задача заключалась в том, чтобы определить наличие или отсутствие наклона оси модуляции, нажав соответствующую клавишу. Время осмотра не ограничивалось. Перед показом каждого изображения демонстрировался бланк с фиксационной точкой, расположенной вблизи одного из углов экрана.

Вероятности фиксации оценивались по эмпирической частоте. Статистическая связь между логарифмом вероятности фиксации и мгновенным значением функции модуляции оказалась максимальной для модуляций контраста ($r = 0,83$, $p < 0,000$). Наибольшей привлекательностью обладают области максимальной контрастности. Для модуляций ПЧ корреляция составила $0,79$ ($p < 0,000$), т. е. чем выше длина волны λ , тем выше привлекательность области. Для модуляций ориентации связь оказалась наименьшей — $0,21$ ($p < 0,05$) и нелинейной. Максимум вероятности приходится на точки, в которых ориентация несущей не отклоняется от исходной. В графическом виде результаты показаны на рис. 2.

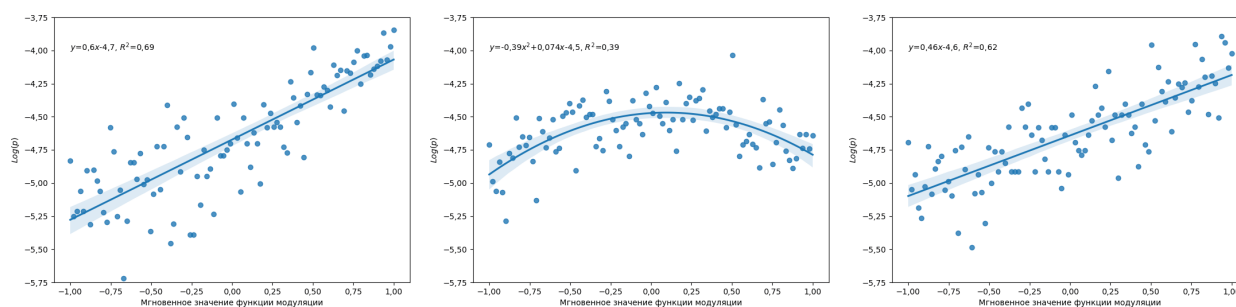


Рис. 2. Зависимости логарифма вероятности фиксации от амплитуды модуляции признака. Слева направо: модуляции контраста, ориентации, ПЧ

Полученные результаты подтверждают предположение о роли зрительных механизмов второго порядка в управлении зрительным вниманием и указывают на новые возможности в области его моделирования.

Литература

1. Grigorescu C., Petkov N., Westenberg M. A. Contour detection based on nonclassical receptive field inhibition // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2003. No. 12(7). P. 729–739.
2. Prins N., Kingdom F. A. A. Detection and discrimination of texture modulations defined by orientation, spatial frequency, and contrast // *Journal of the Optical Society of America A*. 2003. No. 20(3). P. 401–410.
3. Tatler B. W. The central fixation bias in scene viewing: selecting an optimal viewing position independently of motor biases and image feature distributions // *Journal of Vision*. 2007. No. 7(14). P. 1–17.

СТРАТЕГИИ ОБРАБОТКИ 2D- И 3D-СНИМКОВ ГОЛОВНОГО МОЗГА ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ КОГНИТИВНЫХ НАРУШЕНИЙ У ЧЕЛОВЕКА

В. О. Ячная^{1, 2}, М. А. Михалькова¹

¹ Институт физиологии имени И. П. Павлова РАН

² Государственный университет аэрокосмического приборостроения
e-mail: yachnaya_valeria@infran.ru

Аннотация. Данная работа посвящена сравнительному анализу двух систем, основанных на искусственных нейронных сетях и предназначенных для автоматического выявления признаков когнитивных нарушений. Рассмотрены их принципиальные различия, методики исследования и преимущества.

Исследования, проведенные с использованием метода магнитно-резонансной томографии (МРТ), играют важную роль в понимании нейропатологических механизмов, связанных с диагностикой болезни Альцгеймера (БА) и легкими когнитивными нарушениями. Автоматизированный анализ МРТ-снимков может обеспечить точное и быстрое определение БА, ускоряя обработку данных для большого числа пациентов и минимизируя влияние человеческой ошибки.

Данная работа посвящена сравнительному анализу двух систем, основанных на искусственных нейронных сетях и предназначенных для автоматического выявления признаков когнитивных нарушений. Принципиальные различия данных систем заключаются в том, что в одной из них анализируется МРТ-снимок целиком (т. е. трехмерные данные), а во второй — только некоторые наиболее информативные срезы (т. е. двухмерные данные).

Так, исследование [1] представляет систему на основе [2], тестирование которой на различных тестовых выборках показывает точность определения когнитивного состояния в диапазоне от 69,1 % (на международных БД) до 95 % (на российских БД). Однако в [1] отдельно отмечаются сложности, возникающие при автоматической обработке трехмерных МРТ-снимков: в частности, незначительное влияние аугментации 3D-данных на точность системы.

В настоящем исследовании предлагается использовать только часть срезов для каждого из субъектов, анализируя их как двухмерные данные и усредняя результат классификации. Информативными срезами предлагается считать те, на которых виден гиппокамп.

Данные для обучения выбраны из двух открытых баз данных ADNI [3] и OASIS [4], а данные для тестирования собраны на кафедре лучевой диагностики и медицинской визуализации клиники НМИЦ им. В. А. Алмазова.

Несмотря на то, что анализ трехмерных данных позволяет не упустить мельчайшие детали, которые могут быть представлены на МРТ-снимке, данный подход требует как значительных вычислительных ресурсов, так и ресурсов для хранения данных. В свою очередь, анализ двухмерных данных представляет собой более простую задачу, однако дополнительно возникают сложности, связанные с определением информативных срезов МРТ-снимка.

Литература

1. Yachnaya V. O., Mikhalkova M. A. Methods of increasing training data for a 3D neural network for Alzheimer's disease diagnosis // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). St. Petersburg, Russian Federation. 3–7 June, 2024. P. 1–6.

2. *Liu S., Yadav C., Fernandez-Granda C., Razavian N.* On the design of convolutional neural networks for automatic detection of Alzheimer's disease. ML4H@NeurIPS. 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/pdf/1911.03740.pdf> (дата обращения: 20.08.2024).
3. Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative [Электронный ресурс]. URL: <https://adni.loni.usc.edu/> (дата обращения: 20.08.2024).
4. Open Access Series of Imaging Studies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oasis-brains.org/> (дата обращения: 20.08.2024).

АДАПТАЦИЯ ВИДЕОБАЗЫ LRS2 ДЛЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ СЛОВ ПО АРТИКУЛЯЦИИ

В. О. Ячная

Институт физиологии имени И. П. Павлова РАН,
Государственный университет аэрокосмического приборостроения
e-mail: yachnaya_valeria@infran.ru

Аннотация. Данная работа затрагивает вопросы автоматического анализа видеоданных и распознавания речи по артикуляции, в частности, аугментации баз данных (БД) путем слияния визуально похожих БД.

Так, широко используемая для задач визуального распознавания речи и смежных задач [1, 2] БД LRW [3] содержит 500 классов, каждый из которых соответствует одному слову на английском языке; каждый класс представлен 900–1100 видеофрагментами длительностью 1,16 секунды (29 кадров) и разрешением кадров 256×256 пикселей. Исходя из обзора, приведенного в [4], предлагается адаптировать БД LRS2 [5] и привести ее к виду базы LRW. Видеофрагменты в базах LRW и LRS2 имеют схожие визуальные параметры, поскольку обе собраны из одного источника — новостных передач BBC. Однако БД LRS2 включает фразы и предложения, а не отдельные слова, а кадры имеют меньшее разрешение — 160×160 пикселей.

Для адаптации БД LRS2 сначала каждый видеофрагмент в соответствии со своей аннотацией разделяется на отдельные короткие фрагменты, содержащие по одному элементу (слову). Первичное разбиение на слова показало, что в LRS2 содержится более 41 тыс. уникальных элементов, которые можно классифицировать по типу содержащихся в них символов следующим образом:

- Буквенные элементы. В эту категорию входят все элементы, содержащие только буквы английского алфавита: имена нарицательные, собственные, прилагательные, числительные, аббревиатуры и т. п.
- Сложные слова. В данную категорию входят слова английского языка, образованные стяжением (контракцией).
- Числовые элементы. В данную категорию попадают все элементы, в которых содержится одна цифра или более. Например, имена числительные (количественные и порядковые), а также прочие элементы, в основном указывающие время.

Далее последняя категория была конвертирована в буквенный вид. Поскольку одни и те же имена числительные могут быть представлены одновременно как в буквенном виде, так и в цифровом, то в результате конвертации некоторые пары классов «сливаются» друг с другом. Элементы категории сложных слов не были конвертированы, так как стяжение зачастую носит фонетический характер, соответственно, произношение сложного слова и его «разделенного» аналога представляется различными виземами.

Также была произведена оценка длины слов в базе LRS2 двумя методами: по количеству фонем и количеству слогов в слове. Определение количества данных минимальных единиц языка в словах производилось по аналогии с работой [2] (при помощи ресурсов [6] для слогов и [7] для фонем). Те элементы, для которых не удалось определить количество слогов или фонем, исключаются из дальнейшего анализа. Каждое из оставшихся слов состоит из 1–7 слогов и 1–17 фонем, в свою очередь, слова БД LRW состоят из 1–4 слогов и 3–11 фонем [2, 8].

В итоге каждый из 500 классов БД LRW возможно пополнить видеофрагментами из БД LRS2. Кроме того, возможно пополнить БД LRW новыми классами (или составить отдельную аналогичную выборку), поскольку около 200 слов представлены не менее чем 900 видеофрагментами. Это позволит расширить существующие разработки и системы, предназначенные для автоматического распознавания слов по артикуляции.

Литература

1. *Feng D., Yang S., Shan S.* An Efficient Software for Building LIP Reading Models Without Pains // 2021 IEEE International Conference on Multimedia & Expo Workshops (ICMEW), Shenzhen, China. 2021. P. 1–2.
2. *Ячная В. О., Луцив В. Р.* Автоматическое определение количества минимальных единиц языка по артикуляции // Компьютерная оптика. 2024. Т. 48. № 6. С. 956–962.
3. The Oxford-BBC Lip Reading in the Wild (LRW) Dataset [Электронный ресурс]. URL: https://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/data/lip_reading/lrw1.html (дата обращения: 28.08.2024).
4. *Ячная В. О., Луцив В. Р., Малашин Р. О.* Современные технологии автоматического распознавания средств общения на основе визуальных данных // Компьютерная оптика. 2023. Т. 47. № 2. С. 287–305.
5. *Afouras T., Chung J. S., Senior A., Vinyals O., Zisserman A.* Deep Audio-visual Speech Recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018.
6. How Many Syllables [Электронный ресурс]. URL: <https://www.howmanysyllables.com> (дата обращения: 28.08.2024).
7. The Carnegie Mellon University (CMU) Pronouncing Dictionary [Электронный ресурс]. URL: <http://www.speech.cs.cmu.edu/cgi-bin/cmudict> (дата обращения: 28.08.2024).
8. *Yachnaya V. O.* Role of the number of smallest linguistic units in a word on the accuracy of the word-level lip-reading system // 8th International Conference “Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies” SPCN-2023. St. Petersburg, Russian Federation, 2023.

ОБЗОР ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДЕМАСКИРОВКЕ СЦЕН ОПЕРАТОРАМИ С НАРУШЕНИЯМИ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ

Т. В. Брякилева

Институт физиологии им И. П. Павлова РАН
e-mail: tvbryakileva@mail.ru

Аннотация. Эта работа содержит обзор литературы результатов зарубежных авторов, полученных при изучении работы обычных наблюдателей и наблюдателей с нарушениями цветового зрения в задачах обнаружения в различных условиях маскировки. Выявлены расхождения в полученных результатах при использовании разных подходов и методов исследований. Есть зрительные задачи, в которых наблюдатели с отдельными аномалиями цветовосприятия имеют преимущество, но лишь в определенных условиях, в общем преимущество в демаскировке остается за трихроматами.

Еще в 40-е годы XX века были получены данные, согласно которым наблюдатели с нарушениями цветового зрения лучше обнаруживают замаскированные объекты, чем обычные наблюдатели. Следует учитывать разницу между аномальными трихроматами и дихроматами. Если два цвета кажутся одинаковыми для обычного наблюдателя [1], они также будут выглядеть одинаково для дихромата; не всегда верно обратное. Однако это не относится к аномальным трихроматам, поэтому эта группа наблюдателей потенциально может различать цвета, которые кажутся одинаковыми для обычных наблюдателей, и это может облегчить обнаружение замаскированных объектов.

Мартинес-Доминго с коллегами в своей работе не обнаружили преимущества перед нормальными наблюдателями во времени обнаружения замаскированных объектов [2]. Напротив, в работе [3] авторы показали, что острота зрения у мультигенных дихроматов значительно выше, чем у одногенных дихроматов и нормальных трихроматов. Для оптимальной остроты зрения требуется тонкий набор колбочек с одинаковой чувствительностью. Таким образом, дихроматы, внутренняя ямка которых состоит из колбочек с одинаковой спектральной чувствительностью, могут иметь лучшую, чем обычно, остроту зрения, так как, возможно, будет меньше конкуренции в яркостном/контрастном изображении из-за хроматической аберрации и/или других источников «хроматического шума».

Морган, Адам и Моллон показали, что дихроматы способны превосходить нормальных наблюдателей по обнаружению при маскировке [4], но их эксперименты были ограничены точно контролируемым геометрическим дисплеем. В работе [5] Ловелл с коллегами исследовали зрительные системы как трихромата, так и дихромата в отношении изменений освещения в естественных сценах, придя к выводу, что трихроматические млекопитающие имеют преимущество в добывании пищи, потому что их зрительная система менее подвержена влиянию изменения освещения. Позже Саито и соавторы [6] обнаружили, что дихроматы и аномальные трихроматы приматов были быстрее и имели меньше ошибок, чем нормальные трихроматы.

Трощенко с соавторами считает, что дихроматы имеют преимущество, но лишь в определенных условиях, а в общем преимущество в демаскировке остается за трихроматами [7].

Литература

1. *Judd D. B.* Facts of color-blindness // *J. Opt. Soc. Am.* 1943. No. 33(6). P. 294–307.
2. *Martínez-Domingo M., Galdón A., Gómez-Robledo L., Huertas R., Hernández-Andrés J., Valero E.* Color vision deficiencies and camouflage: a comparative study between normal and CVD observers // *Optics Express*. 2022.
3. *Jägle Ht. 1, de Luca E., Serey L., Bach M., Sharpe L. T.* Visual acuity and X-linked color blindness Graefes // *Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2006. Apr. No. 244(4). P. 447. Epub 2005 Aug 23.
4. *Morgan M. J., Adam A., Mollon J. D.* Dichromats detect colour-camouflaged objects that are not detected by trichromats // *Proc R Soc Lond B Biol Sci*. 1992. No. 248(1323). P. 291–295.
5. *Lovell P. G., Tolhurst D. J., Párraga C., Baddeley R., Leonards U., Troscianko J. et al.* Stability of the color-opponent signals under changes of illuminant in natural scenes // *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*. 2005. No. 22(10). P. 2060–2071.
6. *Saito A., Mikami A., Kawamura S., Ueno Y., Hiramatsu C., Widayati K. A., Suryobroto B., Teramoto M., Mori Y., Nagano K., Fujita K., Kuroshima H., Hasegawa T.* Advantage of dichromats over trichromats in discrimination of color-camouflaged stimuli in nonhuman primates // *Am J Primatol*. 2005. No. 67. P. 425–436.
7. *Troscianko J., Wilson-Aggarwal J., Griffiths D., Spottiswoode C. N., Stevens M.* Relative advantages of dichromatic and trichromatic color vision in camouflage breaking // *Behav Ecol*. 2017. No. 28(2). P. 556–564.