

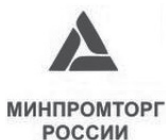
## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция № 1

#### Инновационные проекты. Продукция двойного назначения: технологии, продукты, решения

Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Морозов А.Б., Патрикеев В.Е	<b>Метод динамической интерферометрии и комплекс оборудования для аттестационного контроля статистических параметров поверхностных неоднородностей профилей перспективных крупногабаритных лазерных деталей</b>	14
Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Карасик В.Е., Краснова Е.В., Орлов В.М	<b>Высокоточный метод диагностики статистических параметров поверхностных неоднородностей оптических и лазерных деталей по данным характеристик индикатрисы рассеяния</b>	18
Капустин А.В., Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л.	<b>Контроль формы поверхности зеркал радиотелескопа космической обсерватории «Миллиметрон»</b>	21
Волков В.Г., Моисеев Е.А.	<b>Современные тенденции в разработках объективов для тепловизионных оптических приборов</b>	23
Русов В.А., Серебряков В.А., Дороганов С.В., Калинцева Н.А., Наривончик А.С., Скворцов Д.В.	<b>Электрооптические модуляторы на кристаллах КТР для мощных лазеров среднего ИК-диапазона</b>	25
Данилов О.Б., Жевлаков А.П., Юрьев М.С.	<b>Кислород-йодные лазеры с оптической (солнечной) накачкой</b>	27
Каманина Н.В.	<b>Роль структурирования объёма и поверхности оптических материалов в модификации их основных макропараметров для целей создания гражданской продукции оптико-электронной отрасли</b>	29





Дмитрюк А.В.,  
Иванов В.Н.,  
Татаринцев Б. И.  
Шаповалова Т.С.

**Волоконно-оптические элементы для передачи изображения и освещения на новых физических принципах** 30

Любимов А.И.,  
Ахметов А.Р.,  
Ахметов М.М.,  
Белокопытов А.А.  
Коренной К.С.,  
Скочиллов А.Ф.

**Крупногабаритные голограммные дифракционные решетки с высокой лучевой стойкостью для компрессии лазерных импульсов** 32

Новиков А.Г.,  
Денисов И.Г.,  
Иванов В.П.,  
Шерстюков О.Н.  
Латыпов Р.Р.

**Инновационный подход к проектированию оптико-электронных систем** 36

Архипов С.А.,  
Григорьева О.В.  
Марков А.В.,  
Мироничев В.А.

**О развитии инновационного потенциала гиперспектральной аппаратуры дистанционного зондирования земли** 37

Архипов С.А.,  
Карпунин Д.Н.,  
Саприцкий В.И.  
Тихонычев В.В.

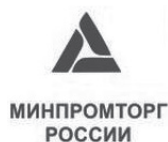
**Радиометрическая калибровка и валидация бортовой аппаратуры – ключ к построению глобальной системы наблюдения земли** 42

Кузьмичев А.М.  
Шиляев А.Ю

**Разработка технологии производства волоконно-оптических передающих модулей с унифицированными разъемными лазерными головками** 46

Швабе





Землянов М.М. Качурин А.С., Мамин А.В., Пименов А.И., Спиридонов Е.П. Кузнецов В.С	<b>Универсальный комплекс сбора, передачи и обработки информации от удаленных датчиков различных типов</b>	48
Азарова В.В., Акишев Ю.С., Голяева А.Ю., Грушин М.Е., Краснов В.И., Петряков А.В., Сухов Е.В., Трушкин Н.И.	<b>Активация диэлектрических поверхностей с помощью холодной плазмы для упрочнения оптического контакта</b>	51
Азарова В.В., Цветкова Т.В., Чертович И.В., Фокин В.В.	<b>Проблемы создания прецизионных зеркал для лазерной гироскопии</b>	54
Сорокин Ю.В.	<b>Фотонные кристаллы в разработке оптико-электронных приборов и комплексов</b>	57
Гусев А.С., Иешкин А.Е., Каргин Н.И., Матющенко И.А. Павлова Е.П., Рындя С.М., Тимашов С.Ф.	<b>Обработка поверхности карбида кремния пучками кластерных ионов и нейтральных атомов и определение параметров шероховатости методом фликер-шумовой спектроскопии</b>	58





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Ростех

Алексеева И.,  
Дымшиц О.,  
Жилин А.,  
Шемчук Д.,  
Запалова С.,  
Центер М.,  
Лойко П.,  
Скопцов Н.,  
Маляревич А.,  
Юмашев К.,  
Богданов К.,  
Виткин В.

**Прозрачные стеклокерамики с нанокристаллами ZnO и Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, активированными ионами кобальта, для пассивной модуляции добротности эрбиевых лазеров безопасной для зрения спектральной области** 60

Кузнецов П.А.,  
Мощев И.С.

**Фотомодуль 320x256 на основе InGaAs/InP для активно-импульсных формирователей изображения** 63

Никонов А.В.,  
Бурлаков И.Д.,  
Болтарь К.О.

**Космическая фотосенсорика** 65

Азербает А.А.,  
Мухаммедзянов Т.  
Семенов А.П.,  
Абдулкадыров М.

**Инновационные вакуумные технологии в производстве крупногабаритных оптических деталей на АО ЛЗОС** 66

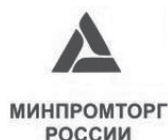
Галявов И.Р.,  
Домнин А.В.,  
Понин О.В.,  
Симонов П.В.,  
Шаров А.А.

**Разработка высокоточных конструкций крупногабаритных оптических систем на основе инновационных технологий изготовления компонентов с применением композиционных материалов** 70

Швабе







Понин О.В.,  
Галявов И.Р.,  
Шаров А.А.,  
Домнин А.В.,  
Симонов П.В.

**Разработка высокоточных конструкций крупногабаритных оптических систем с применением инновационных систем обеспечения геометрической стабильности**

71

Патрикеев В.Е.  
Морозов А.Б.,  
Судариков И.Н.

**Оценка погрешности изготовления крупногабаритных оптических деталей в четырех пространственных диапазонах**

72

Абдулкадыров М.  
Владимиров Н.М.  
Добриков Н.С.,  
Патрикеев В.Е.,  
Семенов А.П.

**Инновационные решения АО ЛЗОС при изготовлении зеркал из карбида кремния**

74

Горшков В.А.,  
Невров А.С.,  
Морозов И.С.

**Внеосевые зеркальные коллиматоры с рабочим полем 200÷1000 мм для контроля качества оптико-электронных комплексов**

78

Горшков В.А.,  
Васильева Е.Ю.,  
Морозова А.В.

**Технология изготовления и контроля асферических линз преобразователя лазерного излучения**

78

Садовников М.А.  
Чубыкин А.А.  
Шаргородский В.

**Инновационные технологии прецизионной радиолазерной дальнометрии в космической геодезии и глобальной навигации**

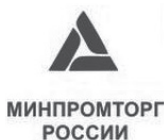
79

Барышников М.В.  
Садовников М.А.  
Чубыкин А.А.  
Шаргородский В.

**Прецизионные лазерные космические комплексы передачи времени**

80





Лобзенёв В.Н.,  
Карпенко Е.С.,  
Земсков В.Ф.,  
Ярцева А.А.

**Модуль оценки качества в рамках программного  
комплекса Image media center** 81

**Секция № 2  
Инновационные проекты.  
Гражданская продукция:  
технологии, продукты, решения, услуги**

Сальникова М.А

**Модуль взаимодействия между программными комплексами конечно-элементного моделирования и оптических расчетов для создания цифровой модели оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ** 85

Модель С.С.,  
Савельева Т.А.  
Линьков К.Г.  
Лощенов В.Б.

**Установка для флуоресцентной диагностики  
и фотодинамической терапии тканей глазного дна** 88

Тарасишин А.В.,  
Бездидько С.Н.,  
Склярков С.Н.,  
Кушнарков К.Г.,  
Мишин С.В.

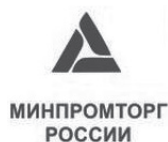
**Лазерный автоколлимационный микроскоп** 91

Александрова Н.Г.  
Волобуев В.Г.,  
Лицарев Н.А.,  
Михайлов С.С.,  
Потапов А.К.,  
Почтарев В.Л.

**Стационарные и мобильные лазерные измерители скорости и дальности с фотофиксацией транспортного средства** 93

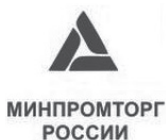
⊖ Швабе





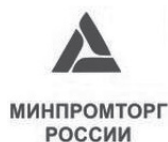
Наривончик А.С., Калинцева Н.А., Павлова А.Л., Серебряков В.А., Скворцов Д.В.	<b>Импульсно-периодические НО: YLF лазеры, проблемы оптимизации</b>	95
Журенков А.Г., Яковлев В.А.	<b>Внедрение оптических технологий для обнаружения нефтеразливов в акватории реки Нева</b>	99
Журенков А.Г., Яковлев В.А.	<b>Оптико-акустическая система обнаружения утечек из подводных нефтегазопроводов</b>	102
Мамонова Д.В., Гольева Е.В., Колесников И.Е., Михайлов М.Д.	<b>Оксидные люминесцентные нанометки в сфере медицины и системах безопасности</b>	105
Гольева Е.В., Мамонова Д.В., Михайлов М.Д., Дунаев А.А., Игнатенков Б.А.	<b>Оптическая нанокерамика из алюмомагниевого шпинели для применения в качестве брони и искусственных драгоценных камней</b>	108
Корешев С.Н., Шевцов М.К.	<b>Голографический коллиматорный прицел с полифункциональным оптическим элементом</b>	111
Самохина И.А., Тибилев А.С.	<b>Роль научно-технического журнала в инновационном процессе</b>	112





Пинаев Л.В., Леонтьева Г.В., Иванова Л.А., Серегин А.Г., Пинаев А.Л.	<b>Лазерный измеритель непрямолинейности и его применение в промышленности</b>	113
Безбородкин П.В. Демидов В.В., Хохлов А.В., Тер-Нерсесянц Е. Комаров А.В.	<b>Диффузно-рассеивающие оптические волокна для медицинских и промышленных приложений</b>	114
Коротаев В.В., Перетягин В.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н.	<b>Система комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов</b>	118
Коротаев В.В., Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Алехин А.А., Перетягин В.С., Павленко Н.А.	<b>Оптико-электронные системы цветового анализа продуктов и материалов</b>	121
Коротаев В.В., Васильев А.С.	<b>Применение комплексирования разносpekтральных изображений в оптико-электронных комплексах мониторинга техносферной безопасности</b>	123
Коротаев В.В., Васильев А.С., Пантюшин А.В.	<b>Разработка цифрового панорамного фотоаппарата</b>	124





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Ростех

Ахметов М.М., Гайнутдинов И.С. Иванов В.П., Лукина А.В., Мельников А.Н., Могилюк И.А.	<b>Высокопроизводительная технология серийного изготовления комбинированной асферической оптики на основе прецизионной репликации с высокоточных мастер-матриц</b>	130
Муравьев Е.А., Малафеев И.Д.	<b>Особенности изготовления покрытий для «солнечно-слепого» ультрафиолетового фильтра на вакуумной установке «Ortus 700»</b>	133
Кольцов А.Ю., Хасанов А.М.	<b>Влияние криогенных температур на спектральные характеристики фильтрующих покрытий на основе материалов PbTe-ZnSe</b>	135
Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э.	<b>Особенности расчета оптических систем, содержащих акустооптические элементы</b>	138
Рожков О.В., Шамаев С.М., Ширанков А.Ф.	<b>Выбор рациональных поверхностей асферизации и расчет параметров асферик широкоугольных-проекторных объективов</b>	139
Немтинов В.Б., Патрикеев А.П., Серииков В.Ю.	<b>Графовая идентификация инновационно-ориентированного потенциала крупного промышленного предприятия (КПП) в области оптико- и лазерно-электронного приборостроения</b>	141

Швабе





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ

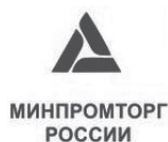


Ростех

Дружин В.В., Степанов В.П., Галихайдаров А.Е.	<b>Способ расчёта компактных оптических элементов для светодиодных источников излучения с целью получения равномерного распределения освещённости</b>	144
Степанов Р.О., Лебедев В.А.	<b>Экспериментальная установка для измерения световозвращательных характеристик оптико-электронных систем ИК диапазона</b>	147
Носов П.А., Павлов В.Ю., Раевский Е.В., Сычкова Е.В., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф.	<b>Оптические системы для современных лазерных технологий и оборудования</b>	151
Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А.	<b>Лазерный флуорометр для дистанционного контроля состояния растительности</b>	154
Булло О.А., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Городничев В.А.	<b>Лазерный флуоресцентный метод контроля состояния растительности</b>	156
Цепулин В.Г., Толстогузов В.Л.	<b>Методы оптического контроля качества плёночных структур</b>	160
Щукин С.И.	<b>Перспективные разработки МГТУ им. Н.Э. Баумана в области биомедицинской техники</b>	162

Швабе





Гладышева Я.В., Барышников Н.В. Животовский И. Денисов. Д.Г.	<b>Алгоритм абсолютной калибровки по методу двух плоскостей</b>	163
Сазонкин С.Г., Дворецкий Д.А., Крылов А.А., Пнёв А.Б., Карасик В.Е.	<b>Волоконные эрбиевые лазеры ультракоротких импульсов для различных применений</b>	166
Колесников М.В., Тимашова Л.Н., Трофимов Н.Е.	<b>Синтез оптической системы телевизионной камеры со стеганографическим каналом</b>	169
Одинокоев С.Б., Ковалев М.С., Соломашенко А. Николаев В.В., Сцепуро Н.Г., Град Я.А., Бетин А.Ю., Дроздова Е.А., Малинина П.И., Гурылев О.А.	<b>Иновационные голограммные и дифракционные оптические элементы в оптических приборах визуального наблюдения</b>	172
Колючкин В.Я., Бойков В.А.	<b>Алгоритм селекции изображений объектов в условиях априорной неопределенности</b>	174





МИНПРОМТОРГ  
РОССИИ



Ростех

Ровенская Т.С., Квиткина К.Э.	<b>Апланатическая сферическая линза с осевым линейным распределением показателя преломления</b>	176
Крюкова К.А., Животовский И.	<b>Дифракционные ответвители, используемые в системах измерения мощности и углового положения оси пучка лазерного излучения</b>	178
Пискунов Т.С., Барышников Н.В. Животовский И.	<b>Методы и средства обеспечения точностных характеристик лазерных локационных систем в условиях внешних механических воздействий</b>	181

Швабе





## **Секция № 1**

**Инновационные проекты.  
Продукция двойного назначения:  
технологии, продукты, решения**

# МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И КОМПЛЕКС ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТТЕСТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРОФИЛЕЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ

**Барышников Н.В.\***, **Денисов Д.Г.\***, **Карасик В.Е.\***,  
**Морозов А.Б.\*\***, **Патрикеев В.Е.\*\***

\*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана» (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

\*\* «АО Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино, Россия  
Приборостроение в оптических технологиях

В работе рассматривается актуальная научно - техническая проблема, посвящённая разработке высокоточного метода и комплекса аппаратуры аттестационного контроля показателей качества профилей перспективных крупногабаритных лазерных деталей в задачах современных оптических технологий. Разработана и научно обоснована методика контроля статистических параметров профилей лазерных деталей субнанометрового уровня на основе расчёта одномерной спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ1) в широком диапазоне частот пространственных неоднородностей.

Разработка высокоточных методов и оптико - электронной аппаратуры метрологического обеспечения в современных задачах оптических технологий направленных на создание перспективных крупногабаритных оптических изделий, является одной из актуальных, активно развивающихся, научно - технических задач. Особый интерес представляют технологии производства и сопутствующие им оперативный высокоточный межоперационный и аттестационный контроль показателей качества (высотных статистических параметров профилей) крупногабаритных изделий лазерной оптики в режимах реального времени. К классу таких деталей можно отнести активные элементы лазерных излучателей технологических установок термоядерного синтеза, имеющих принципиально новый уровень выходной энергии, составляющей единицы мегаджоулей. Стоит отметить, что любая пространственная неоднородность, как на поверхности, так и в структуре материала активных элементов, выходящая за пределы технологического допуска, неизбежно приведёт к потере мощности вследствие эффекта рассеяния, к мелко-масштабной самофокусировке излучения и как следствие к разрушению материала при проходе столь мощного лазерного пучка.

Для реализации высоких выходных энергетических показателей таких комплексов необходимо обеспечить не только принципиально новый уровень технологических методов формообразования эксплуатационных характеристик ангстремного уровня, но и метрологическое обеспечение на этапах межоперационного и аттестационного контроля.

С этой целью в работе рассмотрена возможность разработки перспективных методик высокоточного полноапертурного (до 1 метра) аттестационного контроля профилей крупногабаритных лазерных элементов, имеющих показатели качества: не более 4 ангстрем по параметру  $R_q$  или 35 ангстрем по параметру  $R_z$ .

Для реализации методик высокоточного аттестационного контроля, на протяжении нескольких лет, сотрудниками кафедры «Лазерные и оптико - электронные системы» совместно с ведущим российским предприятием «АО ЛЗОС» в рамках проводимых опытно - конструкторских работ успешно решаются задачи, посвящённые разработки перспективных алгоритмов при проектировании комплекса цеховой контрольно - измерительной оптико - электронной аппаратуры.

На сегодняшний день, в соответствии с общепринятой мировой практикой [1-4] в области оптических технологий, в качестве базовой аппаратуры цехового контроля успешно применяется класс динамических интерференционных приборов и систем, позволяющих проводить высокоточный аттестационный контроль в условиях существующих цеховых вибраций.

Наибольшее распространение получили динамические интерференционные системы компаний 4DTechnology, ESDI, Zygo: PhaseCam 4020, ESDI Intellium H2000, 4D NanoCam Sq, Zygo VeriFire, DynaFiz. Современные динамические интерферометры позволяют регистрировать профиль оптической поверхности с высокой точностью, в том числе и в условиях цеховых вибраций. Однако, существующие алгоритмы и реализованное программное обеспечение современных динамических приборов не позволяют производить оценку статистических параметров поверхностей на основе спектрального анализа, а именно на основе расчёта и характера поведения СПКФ1. Таким образом, данные приборы не всегда корректно применять в задачах аттестационного контроля профилей деталей, имеющих высотные статистические показатели качества субнанометрового уровня. С этой целью в работе рассматриваются инженерные и научно - технические вопросы, посвящённые:

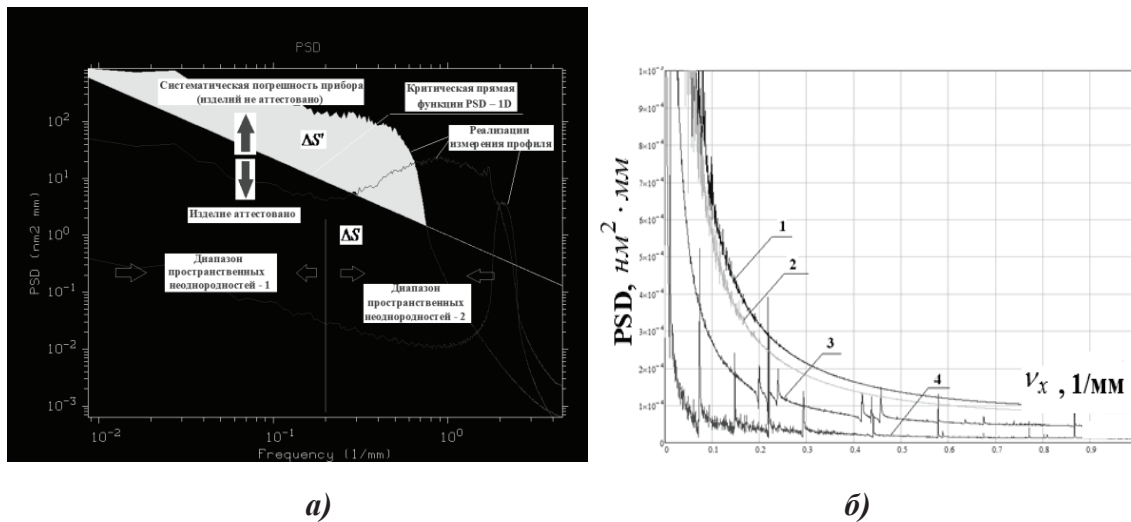
1) Сравнительному анализу современного состояния методов и оптико - электронной аппаратуры высокоточного аттестационного контроля высотных статистических показателей профилей субнанометрового уровня крупногабаритных оптических деталей;

2) Разработке функциональной и оптической схем цехового коллиматора для полноапертурного контроля крупногабаритных изделий, имеющих световую апертуру до 1 метра с целью последующего моделирования различных неоднородностей и их влияния на двумерную спектральную плотность корреляционной функции (СПКФ2) исследуемых поверхностей;

3) Исследованию влияния абберрационных характеристик оптического тракта измерительной системы динамического интерферометра на СПКФ2 исследуемых профилей;

4) Анализу влияния погрешностей алгоритма расчёта высотных статистических показателей исследуемых профилей субнанометрового уровня по данным расчёта одномерной СПКФ и разработка методов их минимизации в соответствии с современными критериями качества;

Проведённые цеховые исследования позволили выдвинуть критерии аттестации крупногабаритных полированных изделий и определения систематической погрешности цехового контрольно-измерительного стенда на основе расчёта функции СПКФ1 (рисунки 1а,б).



**Рисунок 1.**

Графическое представление одномерной спектральной плотности корреляционной функции (PSD или СПКФ1):

- а) аттестация статистических показателей профилей полированных технологических изделий субнанометрового уровня;
- б) характер распределения одномерных спектральных плотностей корреляционных функций профилей оптических деталей, обработанных абразивными микропорошками: 1) M28; 2) M14; 3) M10; 4) полирит-RagetPol

При задании технических и технологических требований к статистическим показателям качества исследуемых крупногабаритных полированных деталей в первом и втором спектральных диапазонах [1-2] используется критическая линия, заданная в соответствии со стандартом ISO10110, и среднеквадратическое отклонение набега фазы в рассматриваемом диапазоне пространственных частот. Все амплитудные значения гармоник лежащих ниже критической прямой удовлетворяют критериям годности эксплуатационных характеристик профиля изделия, а величины всех гармоник вносящих фазовые искажения расположенных выше аттестационной прямой определяют показатели брака изделий.

В случае контроля аттестованной эталонной оптической поверхности, площадь под эталонной кривой функции СПКФ1 в I спектральном диапазоне определяет остаточную погрешность изготовления детали, а площадь выше эталонной кривой в том же диапазоне характеризует величину систематической среднеквадратической погрешности контрольно - измерительного стенда. Таким образом, записав калибровочные данные (файл) со значениями среднеквадратической систематической погрешности аппаратуры контроля, можно выдвинуть требования к средствам и аппаратуре измерения и выявить необходимость в юстировке элементов оптического тракта измерительного канала стендовой контрольно - измерительной системы. Эти данные можно в дальнейшем вычитать из результата контроля статистических показателей оптических поверхностей, что может позволить выделить отдельно взятые инструментальные погрешности (погрешности стендовой аппаратуры и исследуемой детали) и методические погрешности (погрешности алгоритма).

Таким образом, разработанная методика позволяет выдвинуть критерии аттестации показателей качества профилей полированных оптических поверхностей, а так же выдвинуть требования к точностным характеристикам стендовой аппаратуры контроля крупногабаритных деталей. Представленная методика аттестации статистических показателей качества исследуемых профилей крупногабаритных лазерных деталей на основе анализа СПКФ1 позволяет оценивать влияние отдельно взятых поверхностных неоднородностей на результирующую погрешность эффективной шероховатости, что обеспечивает высокую чувствительность и точность диагностики высотных параметров профилей субнанометрового уровня.

#### **Список литературы:**

1. S. Erkin. *Power Spectral Density Specification and Analysis of Large Optical Surfaces* // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7390. DOI: 10.1117/12.823844.
2. J. H. Campbell, R. A. Hawley-Fedder, J.A. Menapace, M.R. Borden. *NIF optical materials and fabrication technologies* // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5341. DOI: 10.1117/12.538462.
3. A.M. Chris. *Systematic Errors in the Measurement of Power Spectral Density* // Proc. SPIE 8681. 2013. Vol. 8681. DOI: 10.1117/12.2012022.
4. Д.Г. Денисов, А.Б. Морозов. «Интерференционный метод и аппаратура контроля поверхностных неоднородностей эталонных оптических изделий», Молодежный научно-технический вестник 2014 .- № 5, <http://sntbul.bmstu.ru/doc/707414.html>.

### **METHOD OF DYNAMIC INTERFEROMETRY AND RANGE OF EQUIPMENT FOR CERTIFICATION CONTROL STATISTICAL PARAMETERS OF SURFACE PROFILE IRREGULARITY ADVANCED LARGE LASER DETAILS**

**Baryshnikov N.V.\*, Denisov D.G.\*, Karasik V.E.\*,  
Morozov A.B.\*\*\*, Patrikeev V.E.\*\***

\*Federal state budgetary institution of higher professional education  
«BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY»  
(National research university of technology), Moscow, Russia  
\*\*JSC «Lytkarino Optical Glass Factory», Lytkarino, Russia

# **ВЫСОКОТОЧНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ И ЛАЗЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО ДАННЫМ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ**

**Барышников Н.В. , Денисов Д.Г., Карасик В.Е.,  
Краснова Е.В., Орлов В.М.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана» (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия  
Приборостроение в оптических технологиях

На основе метода малых возмущений исследован и проанализирован метод дифференциального рассеяния, позволяющий оценивать эффективную величину среднеквадратического значения шероховатости по данным индикатрисы рассеяния и характера поведения спектральной плотности корреляционной функции (СПКФ). Проанализировано влияние шумов электронного тракта, рассеяние Рэлея, а так же аппаратных ограничений приёмного канала прибора на величину измеряемой среднеквадратической эффективной шероховатости.

Задача исследования показателей качества структуры поверхностей оптических и лазерных деталей, является важной и актуальной в оптических технологиях, поскольку оперативный высокоточный межоперационный контроль позволяет обеспечить высокие эксплуатационные и технологические показатели.

Стоит отметить, что для обеспечения высоких технологических показателей качества различных оптических и лазерных деталей нового поколения, необходим не только современный подход к методам и средствам обработки деталей, но и реализация перспективных высокоточных бесконтактных методов диагностики. Особое внимание в единой технологической цепочке занимают стадии глубокой полировки, когда статистические параметры изготавливаемых профилей достигают ангстремных уровней. Для диагностики высотных статистических параметров субнанометрового уровня на сегодняшний день применяются различные классы оптико - электронных приборов и систем. Наибольший интерес в задачах высокоточного аттестационного контроля представляют такие перспективные приборы и системы, как: динамические интерферометры, а так же приборы, позволяющие оценивать среднеквадратическое значение поверхностных неоднородностей по данным анализа индикатрисы рассеянного лазерного излучения. В мировой практике методы, основанные на анализе индикатрис рассеянного лазерного излучения классифицируются на: методы полного интегрального рассеяния (TIS - Total Integrated Scattering), методы определения функции распределения коэффициента отражения по двум угловым координатам (метод определения характеристики BRDF - Bidirectional



Reflectance Distribution Function), методы дифференциального рассеяния (ARS- Angle-Resolved Scattering).

Технической особенностью динамических интерференционных приборов, определяющих их точностные характеристики и динамический диапазон работы, является наличие эталонной оптической поверхности, а так же специальных методик их калибровки в условиях цеховых измерений – в условиях вибраций.

Наряду с этими ограничительными факторами, стоит отметить необходимость проведения экспериментальных измерений по определённым методикам аттестации, позволяющим минимизировать погрешность измерений в производственных условиях. Приведённые недостатки могут быть исключены в методах и аппаратуре, основанных на диагностике индикатрис рассеянного лазерного излучения и в частности в методе ARS, являющимся одним из перспективных высокоточных методов, в задачах диагностики, как однородности оптических материалов, так и поверхностных неоднородностей подложек оптических изделий астрономической и лазерной оптики с нанесёнными покрытиями. Аппаратная реализация данного метода в настоящее время ограничена небольшой номенклатурой научно - исследовательских макетных образцов (рис. 1) [1-2].

Как можно видеть из рисунка 1, характер рассеяния интенсивности электромагнитного поля определяется многими факторами. Кроме размеров неровностей и длины волны падающего излучения, играют роль и размеры рассеивающей площади, и способ ее облучения, а также поляризация первичной волны, отражающие и преломляющие свойства среды и т.д. В зависимости от соотношения между различными параметрами применяют те или иные приближенные методы расчета рассеянного поля.

**Сравнительный анализ функциональных схем оптико – электронных приборов метода ARS**



**Рисунок 1.**

Сравнительный анализ функциональных схем оптико-электронных приборов метода ARS

Для расчета индикатрисы рассеяния на шероховатой оптической поверхности обычно применяют модель, основанную на векторной теории, использующей криволинейное преобразование координат. Такой подход позволяет пользоваться методом теории малых возмущений. Статистические свойства шероховатой поверхности описываются в этом случае функцией СПКФ. При этом обычно ограничиваются гауссовой или экспоненциальной статистикой для описания шероховатости. Метод малых возмущений используется для малых микронеровностей, обладающих малой протяжённостью по сравнению с длиной волны падающего электромагнитного излучения. В его основе лежит разложение искомого поля и граничных условий в ряды по степеням малых параметров  $\sigma_h/\lambda \ll 1$  и  $\sigma_h/l_k \ll 1$  (где  $\sigma_h$ ,  $l_k$  - среднеквадратическое значение высотных параметров и длина корреляции поверхностных неоднородностей соответственно).

Решение задачи рассеяния света на шероховатости диэлектрической поверхности проводится в рамках классической электромагнитной теории с использованием уравнений Максвелла (рис. 2) [3].

**Взаимосвязь индикатрисы рассеяния со статистическими параметрами поверхностных неоднородностей исследуемых профилей**

**Метод базируется на** измерении углового распределения поверхностного рассеяния, связанного с шероховатостью и неоднородностью свойств профиля оптических изделий.

**Постановка задачи:**

Плоская монохроматическая волна

$$E(r) = E_0 \cdot \exp(-i\omega t + ik_0 r)$$

Микропрофиль поверхности  
 $z = f(x, y), (f(x, y)) = 0$   
 $\sigma \ll \lambda, \sigma \ll l_{кор}$

Решение волнового уравнения

$$\Delta E(r) + \varepsilon(r) \frac{\omega^2}{c^2} E(r) = 0, \quad \varepsilon(r) = \begin{cases} 1, & z > f(x, y) \\ \varepsilon, & z < f(x, y) \end{cases}$$

Граничные условия на поверхности  $z = f(x, y)$

$$E_{n1} = \varepsilon E_{n2}, \quad E_{t1} = E_{t2}$$

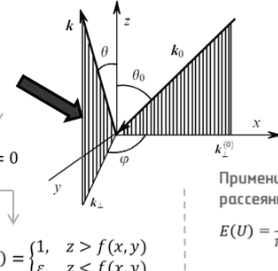
Переход к криволинейной системе координат в соответствии с векторной теорией

$$u_1 = x, u_2 = y, u_3 = z - f(x, y) \exp\left(-\frac{u_3^2}{2a^2}\right)$$

Преобразованное волновое уравнение и граничные условия

$$(\Delta E_0)_0 + \varepsilon(u_3) \frac{\omega^2}{c^2} E = \hat{A} \cdot E, \quad \varepsilon(u_3) = \begin{cases} 1, & u_3 > 0 \\ \varepsilon, & u_3 < 0 \end{cases}$$

$$(\Delta E_0)_0 = \sum \left( \frac{\partial^2 E_i}{\partial u_1^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial u_2^2} + \frac{\partial^2 E_i}{\partial u_3^2} \right) e_i$$



**Решение задачи:**

С помощью теории возмущений в качестве нулевого приближения рассматриваем решение следующей задачи

$$(\Delta E_0)_0 + \varepsilon(u_3) \frac{\omega^2}{c^2} E = -\hat{A}_3 \cdot E$$

Применив метод функций Грина получаем выражение для рассеянного поля

$$E(U) = \frac{1}{\pi^4} \int d^2 k_{\perp} \hat{A}_i(k_{\perp}, k_{\perp}^0) \int g_{ik}(k_{\perp}, u_3, u'_3) \bar{A}_n(u'_3) \hat{E}_k^{(0)}(k_{\perp}^0, u'_3) du'_3$$

$$U = (u_1, u_2, u_3)$$

Представим рассеянное поле в виде

$$E_i(U) \approx -\frac{\exp(ikU)}{16\pi^3} \int d^2 k_{\perp} \hat{A}_i(k_{\perp}, k_{\perp}^0) \alpha(k_{\perp}, k_{\perp}^0) \approx -\frac{\exp(ikU)}{16\pi^3} \int d^2 k_{\perp} F(k_{\perp}, k_{\perp}^0)$$

$$\alpha(k_{\perp}, k_{\perp}^0) \exp(iku_3) = \int g_{ik}(k_{\perp}, u_3, u'_3) \bar{A}_n(u'_3) \hat{E}_k^{(0)}(k_{\perp}^0, u'_3) du'_3$$

Дифференциальное рассеяние:

$$\frac{dI_i}{d\Omega} = \frac{1}{\pi^2} \frac{\cos^2 \theta}{\cos \theta_0} (F_i(k'_{\perp}, k_{\perp}^0) F_i(k'_{\perp}, k_{\perp}^0))$$

С точностью до первого порядка по  $f(x, y)$ , учитывая преобразованную функцию  $\alpha_1(k_{\perp}, k_{\perp}^0)$

$$\frac{1}{I_0} \frac{dI_i}{d\Omega} = \frac{\omega^4 (\varepsilon - 1)^2}{\pi^2 c^4} \cos \theta_0 \cos^2 \theta \cdot g(k_{\perp} - k_{\perp}^0) \cdot [ |F_{si}|^2 + |F_{pi}|^2 ]$$

**Рисунок 2.**

Методический анализ дифференциального метода в рамках приближений малых возмущений поверхностных неоднородностей исследуемых профилей

С целью апробации полученного соотношения между параметрами индикатрисы рассеяния и статистическими характеристиками исследуемых поверхностей, в работе было проанализировано восстановление эффективной величины среднеквадратического значения высотных параметров исследуемых профилей с учётом шумов электронного тракта аппаратуры контроля, эффекта рассеяния на молекулах (рассеяния Рэлея) и аппаратных ограничений (диапазон углов рассеяния 5°-85°). В результате проведённых



научных исследований, выработаны требования к структурно - функциональной схеме прибора, к среднеквадратическому значению дисперсии шумов аппаратуры контроля, уровню рассеяния для поверхностей с определённым типом статистики распределения и уровня поверхностных неоднородностей.

#### **Список литературы:**

1. A. Duparre, J. Ferre-Borrull, S. Gliech, G. Notni, J. Stenert, J.M. Bennet. *Surface characterization techniques for determining the rootmean-square roughness and power spectral densities of optical components* // Applied optics. 2002. Vol. 41. N1. P. 154-171.
2. J.M. Elson. *Theory of light scattering from a rough surface with an inhomogeneous dielectric permittivity* // The American Physical Society. 1984.10. Vol. 30. P. 5460-5479.
3. J.M. Elson, J.M. Bennett. *Relation between the angular dependence of scattering and the statistical properties of optical surfaces* // Optical Society of America. 1979. Vol. 69. N1.

### **PRECISION METHOD FOR DIAGNOSIS OF STATISTICAL PARAMETERS SURFACE DISCONTINUITIES OPTICAL AND LASER PARTS ACCORDING CHARACTERISTICS OF LIGHT SCATTERING**

**Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Karasik V.E.,  
Krasnova E.V., Orlov V.M.**

Federal state budgetary institution of higher professional education  
«BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY»  
(National research university of technology), Moscow, Russia

### **КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ РАДИОТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»**

**Капустин А.В., Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
Аттестационный контроль отражающих поверхностей  
интерференционными методами

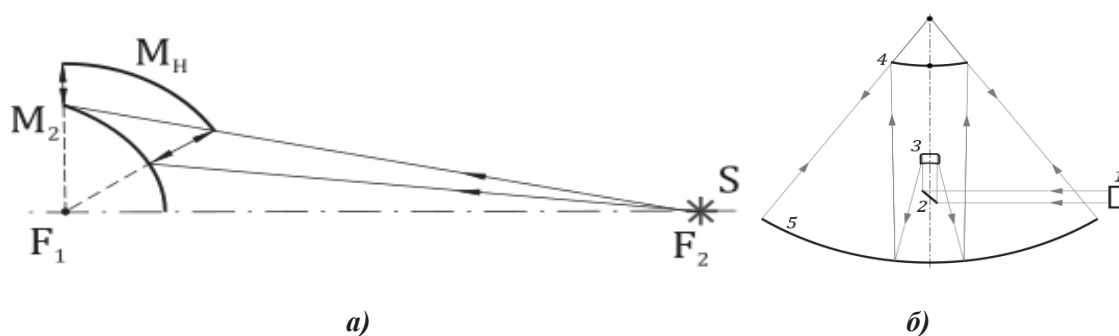
Предложены методы контроля поверхностей зеркал радиотелескопа «Миллиметр» интерференционными методами.

В рамках федеральной космической программы ведутся работы по созданию космической обсерватории субмиллиметровых длин волн, проект носит название «Миллиметр» [1].

Оптическая система телескопа построена по классической схеме Кассегрена и состоит из 10-метрового составного главного зеркала и вторичного зеркала диаметром 542

мм. Составное зеркало образовано 72 внеосевыми сегментами образованными радиально-кольцевым делением на 24 азимута и 3 яруса и имеет центральное зеркало диаметром 3 метра.

Наиболее сложным для контроля зеркалом является вторичное гиперболическое зеркало, которое имеет экстремальные характеристики: радиус кривизны при вершине  $R_0 = 255$  мм, коническая константа  $k = -1.147$ . Контроль поверхности методом анаберационных точек с помощью превосходящей по размеру сферы Хиндла для данного зеркала требует вспомогательного сферического зеркала диаметром более 6 метров с радиусом кривизны более 3 метров, что невозможно технологически. Задачу контроля предлагается решать раздельным контролем периферийной и центральной области контролируемого зеркала. В этом случае контроль периферийной области осуществляется по схеме Хиндла сферическим зеркалом с переналожением и последующей сшивкой интерференционной картины, а контроль центральной области может быть осуществлен с помощью того же сферического зеркала и зеркально-линзового компенсатора диаметром до 25 мм. При раздельном контроле центральной и периферийных зон вторичного зеркала вспомогательное сферическое зеркало является технологичным и имеет диаметр сравнимый с контролируемым зеркалом.



**Рисунок 1.**

Раздельный контроль поверхности вторичного зеркала:  
а) контроль периферийной части, б) контроль центральной части

Контроль вогнутого центрального параболического зеркала предлагается выполнить компенсационным методом в схеме интерферометра Тваймана-Грина. Рассчитанный компенсатор состоит из двух менисковых линз диаметром до 180 мм.

Для контроля формы поверхности параболических сегментов главного зеркала предлагается использовать попарный контроль трех сегментов одного типоразмера. В основе данного метода лежит известный метод абсолютного контроля трех пробных стекол [2]. В измерительной ветви интерферометра организуется анаберационный ход лучей, при этом два контролируемых сегмента устанавливаются навстречу друг другу, таким образом, что лучи из фокуса одного сегмента собираются в фокусе другого сегмента, который совмещен с центром кривизны эталонного вогнутого сферического зеркала, обеспечивающего автоколлимационный ход лучей. После получения интерференционных картин от трех пар сегментов может быть составлена и решена система из трех уравнений определены отклонения формы каждого из сегментов.

#### Список литературы:

1. millimetron.ru
2. А.Н. Захарьевский, *Интерферометры*, с.161-162, (1952).

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКАХ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Волков В.Г., Моисеев Е.А.\*

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

\*ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия  
Оптико-электронное приборостроение, тепловидение

Высокие качественные параметры ФПУ в последние годы резко повысили планку в достижении предельных выходных оптических параметров ИК объектов. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к расчетам оптического тракта, конструированию и всем этапам сборки и юстировки данных систем.

В настоящее время бурными темпами проводится комплексные фундаментальные и прикладные исследования и разработки в области создания тепловизионных оптических систем. Прежде всего, это связано с повышенной актуальностью решения целого ряда технических задач в интересах военных ведомств различных стран, в том числе и Российской Федерации, а также крупными достижениями в области создания фотоприемных устройств с повышенными выходными характеристиками.

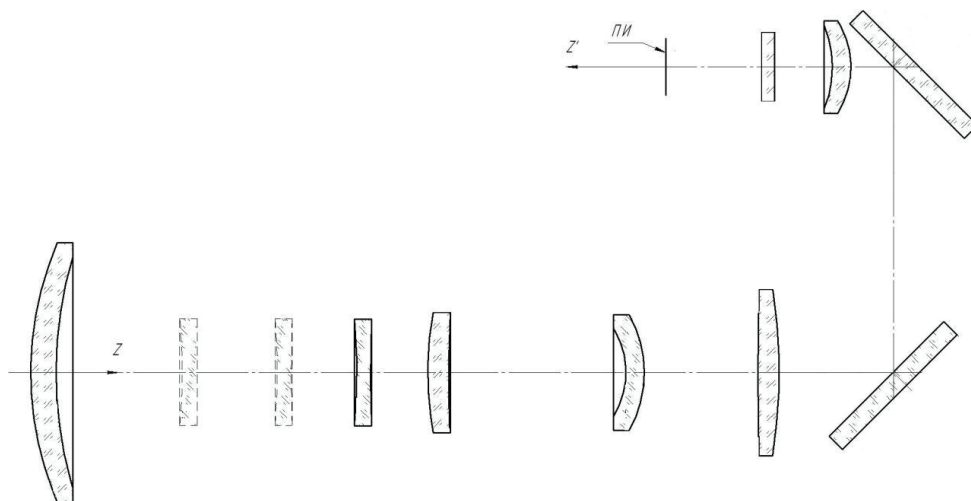
На сегодняшний день целый ряд отечественных и зарубежных фирм занимаются разработкой и промышленным изготовлением вышеуказанных приборов. В Российской Федерации – АО «НПО «ГИПО», НИИ «Циклон», «Пергам», ПАО КМЗ, Astrohn, и др. В мире данными разработками активно занимаются компании FLIR, Fluke, SAT Infrared Technology и др.

Одним из основных компонентов тепловизионных приборов являются объективы, работающие в различных спектральных инфракрасных диапазонах. Высокие качественные параметры ФПУ в последние годы резко повысили планку в достижении предельных выходных оптических параметров объективов. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к расчетам оптического тракта, точности изготовления оптических деталей, конструированию и всем этапам сборки и юстировки данных систем.

Современные тепловизионные приборы функционируют в двух спектральных диапазонах, а именно 3 – 5 и 8 – 14 мкм, некоторые из типов приборов являются комбинированными и работают в двух вышеуказанных диапазонах одновременно. Каждый из них обладают определенными достоинствами. Преимуществами объективов для области спектра 3 – 5 мкм по сравнению с объективами для области 8 – 14 мкм являются:

- более высокое качество изображения за счет меньшего дифракционного кружка рассеяния (по формуле  $d = \frac{\lambda}{1,22}$ );
- увеличенный номенклатурный ряд оптических материалов, прозрачных в диапазоне 3 – 5 мкм, что в свою очередь расширяет возможность коррекции выходных параметров объектива на этапе расчета;
- повышенные светотехнические параметры просветляющих покрытий и соответственно более высокое светопропускание оптической системы
- более эффективная работа в условиях повышенной влажности и по воздушным целям [1].

Не менее важной задачей в области разработки тепловизионных систем являются требования минимизации массогабаритных параметров, что в свою очередь предъявляет к разработчикам оптических систем особые требования по использованию в оптических трактах нетрадиционных оптических элементов (асферических, киноформных и комбинированных, с целью уменьшения количества оптических деталей и aberrаций в оптическом тракте), а также использование зеркал и призм для получения возможности изменения направления хода оптических лучей в оптической схеме.



**Рисунок 1.**

Ломанная оптическая схема с подвижным оптическим компонентом, в которой используется нетрадиционный киноформный оптический элемент

Для достижения более высоких выходных параметров объективов на этапе расчета оптических систем закладываются максимально жесткие допуски на различные геометрические параметры, которые труднодостижимы на этапе изготовления отдельных оптических и механических компонентов, а также на этапе сборки и юстировки [2]. Для решения вышеуказанных задач требуется использовать принципиально новые технологии изготовления оптических деталей и метрологические приборы с повышенными точными параметрами проводимых измерений. В частности, на этапе сборки для контроля децентрирования линз и их положения в пространстве относительно посадочных баз оправ и корпусов объективов, а также оптимизация методов крепления, с целью повышения надежности конструкций и исключения возможности внутренних напряжения на всем этапе жизненного цикла прибора.

В докладе подробно анализируются различные типы объективов, используемых ведущими мировыми производителями, а также технологически и конструкторские подходы для решения задач, связанных с повышением оптических параметров и максимального уменьшения массогабаритных характеристик объективов и приборов в целом.

#### Список литературы:

1. И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. *Видение и безопасность*. 840 с, (2009).
2. С.М. Латыев. *Конструирование точных (оптических) приборов*. 560 с (2015).

# ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ НА КРИСТАЛЛАХ КТР ДЛЯ МОЩНЫХ ЛАЗЕРОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

Русов В.А., Серебряков В.А.\*, Дороганов С.В., Калинцева Н.А.,  
Наривончик А.С., Скворцов Д.В.

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

\*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Лазерная физика. Методы управления оптическим излучением

Представлены результаты экспериментальных исследований по применению модуляторов на кристаллах КТР с использованием схемы компенсации двулучепреломления, в которой кристаллографические оси кристаллов имеют одинаковую ориентацию. Выбранная схема позволяет скомпенсировать не только естественное двулучепреломление кристаллов, но и индуцированные лазерным нагревом термоискажения. Это позволило создать для лазеров с высокой средней мощностью модуляторы с контрастом  $K \geq 100$ .

## Введение

В высокомошных импульсно-периодических лазерах среднего ИК диапазона для реализации моноимпульсного режима обычно используют акустооптические модуляторы [1], либо пассивные затворы [2], хотя хорошо известно, что применение электрооптических устройств для решения подобных задач имеет ряд неоспоримых преимуществ [3]. В частности, с их помощью возможно получение существенно больших значений энергии в импульсе из-за высоких значений лучевой прочности и контраста при апертуре  $>1$  см подобных модуляторов. Это относится как к модуляторам на кристаллах бета бора барию  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$  (ВВО), так и к модуляторам на кристаллах семейства калий титанил фосфата  $\text{KTiOPO}_4$  (КТР), широко используемых в ближнем ИК диапазоне.

Ограниченное применение электрооптических устройств в лазерных системах среднего ИК диапазона связано со следующими обстоятельствами:

– кристаллы ВВО имеют довольно низкие значения электрооптических констант ( $r_{11} = 2,7$  пм/В) и их использование представляется весьма проблематичным из-за высоких управляющих напряжений (полуволновое управляющее напряжение составляет порядка 85 кВ/см);

– что касается применения более низковольтных модуляторов на кристаллах КТР, также прозрачных вплоть до 3 мкм, то уже при средней мощности лазерного излучения порядка 5,0 Вт в результате ее поглощения, возникает температурный градиент показателя преломления, приводящий к уменьшению коэффициента пропускания модулятора [1,2].

В КТР модуляторах маломощных лазеров хорошо зарекомендовала себя схема термокомпенсации на двух кристаллах, развернутых друг относительно друга на  $90^\circ$ .

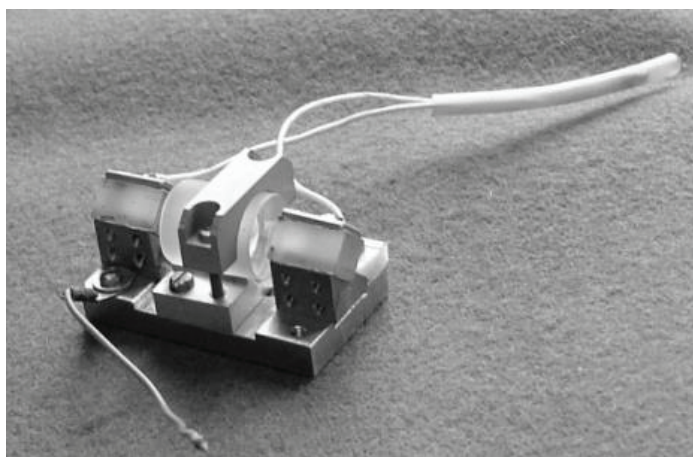


Однако индуцированный поглощением лазерного излучения температурный градиент показателя преломления скомпенсировать в такой схеме не представляется возможным.

В настоящей работе использована иная конструкция модулятора, в которой кристаллы не разворачиваются друг относительно друга на  $90^\circ$ , а имеют одинаковую ориентацию. Для компенсации естественного двулучепреломления в кристаллах между ними дополнительно устанавливается полуволновая пластина. Возникающие же в результате лазерного нагрева термоискажения в разных кристаллах лежат в одной плоскости и при одинаковых коэффициентах поглощения должна происходить их компенсация, соответственно, увеличивая коэффициент пропускания модулятора.

### Экспериментальные результаты

Новая конструкция модулятора (рис. 1.) была апробирована в Ho:YLF лазере ( $\lambda = 2,051$  мкм) с продольной накачкой тулиевым волоконным лазером и показано, что разработанные модуляторы могут эффективно использоваться при средней мощности до 20 Вт и при этом потери на двулучепреломление в кристаллах КТР, наведенные лазерным излучением, не превышают единиц процентов.

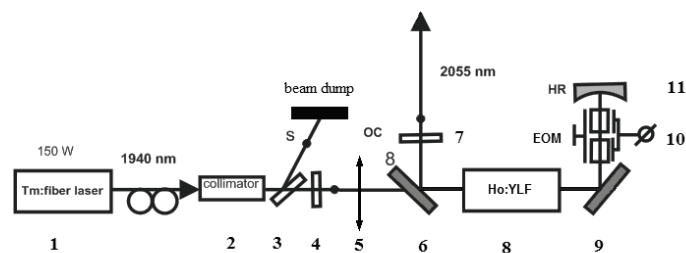


**Рисунок 1.**

Разработанный модулятор

В этой схеме кристаллы не разворачиваются друг относительно друга на  $90^\circ$ , а имеют одинаковую ориентацию. Дополнительно между ними устанавливается  $90^\circ$  вращатель поляризации. При одинаковых уходах температуры кристаллов разность фаз, связанная с естественным двулучепреломлением, в такой схеме также будет равна нулю. Кроме того, возникающие температурные градиенты в разных кристаллах лежат в одной плоскости и при одинаковых коэффициентах поглощения кристаллов в модуляторе должна происходить их компенсация, приводящая к увеличению его контраста. Новая конструкция модулятора была апробирована в Ho:YLF лазере с диодной накачкой, оптическая схема которого представлена на рис. 2.

В непрерывном режиме дифференциальная эффективность лазера составляла 35%. В режиме модуляции добротности при частоте 1,0 кГц энергия в импульсе достигала 20 мДж при длительности импульса 15 нс с параметром качества пучка  $M^2 \approx 1,2$ . При этом потери на двулучепреломление в кристаллах модулятора, наведенные излучением генерации, не превышали единиц процентов.



**Рисунок 2.**

Оптическая схема Ho:YLF лазера с модулятором на кристаллах КТР.

- 1 – тулиевый волоконный лазер(НТО “ИРЕ-Полнос”); 2-коллиматор; 3 – поляризатор;  
 4 – полуволновая пластина  $\lambda/2$ ; 5 – линза, формирующая моду накачки; 6,9 – дихроичные  
 зеркала(фирмы Layertec); 8 – активный элемент Ho:YLF; 7, 11 – зеркала резонатора;  
 10 – модулятор на кристаллах КТР с пластиной  $\lambda/2$

### Заключение

Разработанная схема компенсации термонаведенного двулучепреломления, в которой кристаллографические оси кристаллов имеют одинаковую ориентацию, позволила создать для лазеров с высокой средней мощностью модуляторы с контрастом  $K \geq 100$ .

### Список литературы:

1. С.А. Ebberts, S.P. Velsko. *High average power KTiOPO4 electro-optic Q switch*. Appl. Phys. Lett. V. 67, No 5, 593-595, 1995.
2. В.А. Русов, А.Б. Каплун, А.В. Горчаков, В.А. Серебряков. *Применение ЕОМ на кристаллах КТР в высокомоощных Nd:YAG лазерах*. Оптич. журнал 76 (6), 6-15, 2009

## ELECTRO-OPTIC KTP MODULATOR FOR HIGH-POWER MID-IR LASERS

### КИСЛОРОД-ЙОДНЫЕ ЛАЗЕРЫ С ОПТИЧЕСКОЙ (СОЛНЕЧНОЙ) НАКАЧКОЙ

Данилов О.Б. , Жевлаков А.П., Юрьев М.С.

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, показывающие возможность разработки кислород-йодного лазера (КИЛ) с прямой оптической накачкой молекулярного кислорода при реализации

межмолекулярного взаимодействия с переносом заряда от молекулы-донора (буферный газ) к молекуле-акцептору (кислород). Это взаимодействие снимает вырождение с нижних энергетических состояний молекулярного кислорода, увеличивает сечение его поглощения в видимом диапазоне спектра и УФ полосе Герцберга. Одновременно реализуется высокий квантовый выход синглетного кислорода (соответственно  $QY \sim 1$  и  $QY \sim 2$ ). Разработаны частотно-импульсные источники оптической накачки с энергией импульса  $\sim 50$  кДж, длительностью импульса  $\sim 25$  мкс и частотой повторения  $\sim 10$  Гц, согласованные с механизмом генерации синглетного кислорода. Это позволяет реализовать частотно-импульсный кислород-йодный лазер с эффективностью  $\sim$  до 25%, при этом оптическая эффективность составляет  $\sim 40\%$ , параметр  $L/T \sim 1/1.5$ , где  $T$  – тепловая энергия, выделяемая в активной среде лазера при генерации им энергии  $L$ . Показано, что при прямой солнечной накачке молекулярного кислорода параметр эффективности КИЛ может достигать величины  $L/T \sim 1/0.8$  в широком диапазоне масштабирования.

#### Список литературы:

1. J.W. Arbogast, A.P. Darmany, C.S. Foote, Y. Rubin, F.N. Diederich, M.M. Alvarez, S. Janz, R.L. Whetten // *J. Phys. Chem.* 1991. V. 95. P. 11.
2. А.А. Мак, О.Б. Данилов, И.М. Белоусова. Патент на изобретение № 2181224 «Способ получения генерации стимулированного излучения на атомах иода», приоритет от 20.06.2000.
3. O.B. Danilov, I.M. Belousova, A.A. Mak, V.P. Belousov, V.M. Kiselev et al. // *Proc. SPIE.* 2003. V. 5479. P. 29–34.
4. O.B. Danilov, I.M. Belousova, A.A. Mak, V.P. Belousov, V.M. Kiselev et al. // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5448. P. 344–349.
5. Н.Н. Юрьшев // *Квант. электрон.* 1998. Т. 25. № 5. С. 410–412.
6. E.A. Katz // *ACN'2011.* St. Petersburg, 2011.
7. Zh. Alferov, V. Andreev. *Concentrator photovoltaics* // *Library of Congress.* CN: 2007923072.
8. W.F. Krupke // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5448. P. 7–17.
9. T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida, M. Nakatsuka et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2007. V. 90. P. 261120.
10. T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida, K. Yoshida. et al. // *Opt. Lett.* 2009. V. 34(2). P. 175–177.
11. S.H. Choi, J.H. Lee, W.E. Meador, E.H. Conway // *J. Sol. Energy. Eng.* 1997. V. 119(4). P. 304–311.
12. О.Б. Данилов, М.С. Юрьев // *Опт. и спектр.* 2011 Т. 111. № 2. С. 157



# РОЛЬ СТРУКТУРИРОВАНИЯ ОБЪЁМА И ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В МОДИФИКАЦИИ ИХ ОСНОВНЫХ МАКРОПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СОЗДАНИЯ ГРАЖДАНСКОЙ ПРОДУКЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ

**Каманина Н.В.**

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
СПбЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия

В силу актуальности изучения физико-химических эффектов в новых структурированных неорганических и органических материалах, включая жидкие кристаллы, способных конкурировать по своим структурным и оптическим свойствам с объёмными неорганическими классическими материалами, учитывая возможность использования структурированных систем в оптимизации технологических процессов для нано- и биотехнологий, применяемых в гражданском приборостроении для целей телекоммуникаций, дисплейной, лазерной, биомедицинской техники, промышленного производства, др., Исследование свойств инновационных структурированных гибридных материалов с новыми нано-объектами, красителями и ДНК является своевременным и достаточно востребованным. При этом стоит сказать, что изучение именно структурных и оптических эффектов в материалах занимает особое место в современном становлении инновационных технологий. Это связано с существенным расширением областей применения последних, так как энергия фотона лежит в диапазоне электронных и колебательных переходов в веществе, следовательно, это обстоятельство позволяет использовать свет, а более конкретно, именно лазерное излучение, как для получения уникальной информации о структурных, рефрактивных и динамических свойствах материалов, о проявлении новых и подтверждении классических эффектов в них, так и применять лазерные источники для моделирования свойств исследуемых матричных систем.

В данном сообщении кратко показана перспективность процесса структурирования как объёма (на примере органических систем), так и поверхности (на примере неорганических материалов) для создания новых композитных устройств с уникальными физико-химическими свойствами: поляризационных плёнок для оптических микроскопов и магнитометров лазерного излучения; аналогов дисплейных элементов с проводящим ИТО, выполняющим одновременно роль ориентанта и проводника; просветлённых выходных окон УФ и ИК-диапазона спектра на основе  $MgF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $CaF_2$  и  $LiF$ ; упрочнённых материалов на основе  $KBr$  для Фурье-спектроскопии, матриц на основе  $ZnS$  и  $ZnSe$  для полупроводниковых и лазерных устройств; хлоридов натрия  $NaCl$  и калия  $KCl$  с повышенными параметрами по гидрофобности, др.

Работа основана на заделе отдела «Фотофизика сред с нанообъектами» АО «ГОИ им. С.И.Вавилова» (Санкт-Петербург) при выполнении проектов: ФЦП НТБ «Лимитер» (2003-2006), «Модулятор с ПЭВ» (2011), «Нанокоатинг-ГОИ (2012-2015), а также грантов РФФИ №10-03-00916-а (2010-2012) и №13-03-00044-а (2013-2015), международных проектов МНТЦ, проект IPP A-1484 (2007-2009) и проект FP7, Marie Curie Action, проект «BIOMOLEC» (2012-2015).

# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЯ И ОСВЕЩЕНИЯ НА НОВЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ

Дмитрюк А.В., Иванов В.Н., Татаринцев Б.И., Шаповалова Т.С.

АО «Научно-исследовательский и технологический институт  
ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия  
Волоконная оптика

Впервые получены волоконно-оптические элементы (ВОЭ) на основе поперечной Андерсоновской локализации света. Определены основные характеристики ВОЭ, полученных по новой технологии, и показаны их преимущества перед традиционными ВОЭ. Проанализированы основные области применения новых ВОЭ.

Жесткие волоконно-оптические элементы (ВОЭ), объединяющие в одном оптическом элементе до  $10^5$  мм<sup>-2</sup> единичных оптических световодов, находят широкое применение в различных современных оптико – электронных устройствах для передачи и преобразования изображения, таких как: приборы ночного видения (охотничьи прицелы, автотранспорт, охранные системы наблюдения и т.д.), жесткие эндоскопы, в том числе медицинские, цифровая рентгеновская диагностика, дефектоскопия [1].

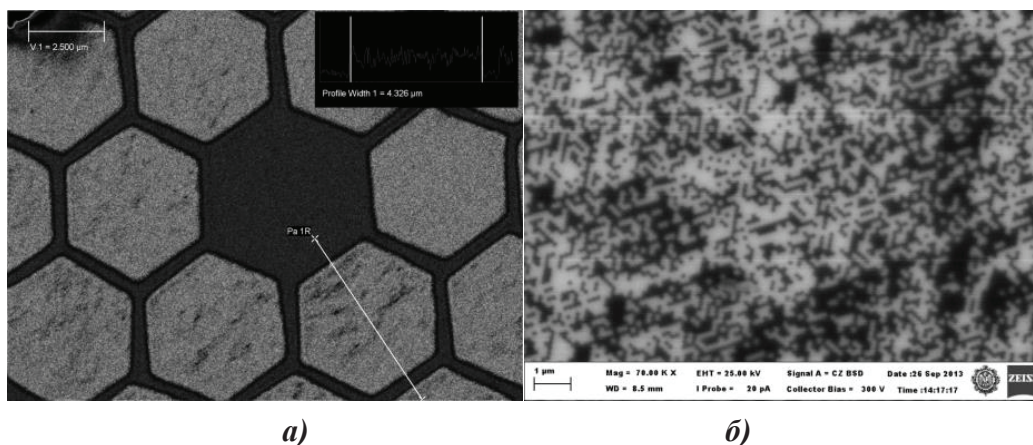
Существующие до последнего времени принципы конструирования ВОЭ постулируют регулярную структуру ВОЭ с трансляционной симметрией в поперечном сечении. Характерные поперечные размеры единичного световода ВОЭ с регулярной структурой, определяющие пространственную разрешающую способность ВОЭ, составляют 3 – 8 мкм.

Нами впервые предложен и реализован альтернативный подход к созданию ВОЭ, а именно, использование неупорядоченной в поперечном сечении структуры из стекол с различными показателями преломления, которая сохраняется вдоль оптической оси элемента [2]. Характерные поперечные размеры единичного элемента структуры имеют размеры около 200 нм, что существенно меньше длины волны излучения. Примеры структуры стандартного ВОЭ и разработанного по новой технологии приведены на рис. 1.

С помощью новой технологии реализованы основные типы жестких ВОЭ для передачи изображения: оптические элементы с прямой передачей изображения, волоконно-оптические элементы с поворотом изображения на 180°, фоконы для передачи изображения с увеличением/уменьшением, элементы жестких эндоскопов (диаметр 1-2 мм, длина до 250 мм) для передачи изображения.

Принцип работы ВОЭ с неупорядоченной поперечной структурой основан на новом физическом явлении – поперечной Андерсоновской локализации света [3-4] и не может быть описан в рамках традиционного приближения геометрической оптики, применимой для стандартных ВОЭ [1].

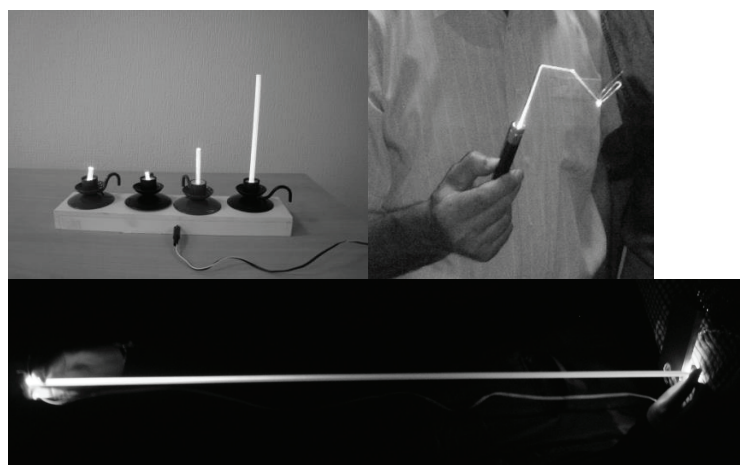
Результаты испытания моделей ВОЭ с неупорядоченной структурой показали, что они обладают рекордным пространственным разрешением: до 150 - 180 мм<sup>-1</sup>, что существенно превышает характеристики существующих ВОЭ.



**Рисунок 1.**

Электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения  
а) стандартного ВОЭ, б) с неупорядоченной структурой

Используя поперечную Андерсоновскую локализацию света, нами предложен и реализован новый подход к созданию протяженных источников света на основе наноструктурированных ВОЭ с неупорядоченной структурой [5]. В новых осветительных элементах излучение полупроводниковых светодиодов, введенное через торцевую часть ВОЭ, диффузно рассеивается через его боковую поверхность. Примеры реализации осветительных устройств на основе диффузно рассеивающих свет через боковую поверхность ВОЭ приведены на рис. 2.



**Рисунок 2.**

Фотографии макетов осветительных устройств на основе  
ВОЭ с неупорядоченной структурой. В качестве источников света использованы  
светодиоды с потребляемой электрической мощностью 60 мВт

Основными потенциальными областями применения осветительных ВОЭ являются: взрывоопасные производства (пороховые заводы и т.д.); подсветка панелей управления (авиационная техника, бронетехника); внешнее и внутреннее освещение транспортных средств; медицина (фототерапия), в том числе фототерапия в перинатальных центрах; фотостерилизация в пищевой и медицинской промышленности и т.д.

Новые осветительные ВОЭ обладают рядом преимуществ перед существующи-

ми диффузно рассеивающими осветительными кварцевыми волокнами [6] (Corning Fibrance™ – Diffusing Fiber). В частности, числовая апертура ВОЭ с неупорядоченной структурой - NA достигает значений  $NA = 1.06$ , в то время как для кварцевых волокон  $NA = 0,17 - 0,39$ . Высокая числовая апертура существенно облегчает проблему ввода в осветительный элемент излучения светодиодных источников.

#### Список литературы:

1. В.Б. Вейнберг, Д.К. Сагтаров. *Оптика световодов*. Л., «Машиностроение», 320 с, (1977).
2. А.В. Дмитрюк, Б.В.Татаринцев, В.Н. Иванов, Т.С. Шаповалова. Патент RU 2578693 от 29.12.2014.
3. A. Mafi, S. Karbasi, K.W. Koch, T. Hawkins, J. Ballato, *Materials*. 7, p.p. 5520-5527, (2014).
4. Mafi. *Advances in Optics and Photonics*. 7, p.p. 459-515, (2015).
5. А.В. Дмитрюк, Б.В.Татаринцев, В.Н. Иванов, Т.С. Шаповалова. Патент RU 2583892 от 09.02.2015.
6. P. Tandon, M. Li, D.C. Bookbinder, S.L. Logunov, E.J. Fewkes. *Nanophotonics*, 2, № 5-6, p.p. 383-392, (2013).

## КРУПНОГАБАРИТНЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С ВЫСОКОЙ ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ КОМПРЕССИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

**Любимов А.И., Ахметов А.Р., Ахметов М.М., Белокопытов А.А.,  
Коренной К.С., Скочиллов А.Ф.**

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт  
прикладной оптики», г. Казань, Россия  
Голография и лазерная техника

В докладе рассмотрены вопросы разработки голограммных дифракционных решеток с высокой лучевой стойкостью для компрессии лазерных импульсов, а также представлены успехи АО «НПО ГИПО» в решении этой задачи.

#### Введение

Все современные мощные лазерные установки, создаются и работают по принципу CPA (Chirped Pulse Amplification) [1]. Такие лазеры находят применение в установках лазерной медицины (хирургия, лечение онкологических заболеваний), прецизионной обработке материалов, установках управляемого термоядерного синтеза, установках для фундаментальных исследований нелинейных сред, быстротекающих процессов и

экстремальных состояний материи, системах лазерного оружия, локации и связи.

Актуальность разработки конструкций и технологий изготовления крупногабаритных дифракционных решеток (ДР) с повышенной лучевой стойкостью и дифракционной эффективностью обусловлена необходимостью обеспечения серийного выпуска ДР для компрессоров импульсов мощных лазеров. Габариты ДР и лучевая стойкость дифракционной структуры определяют максимальную мощность, которую способен выдержать компрессор без разрушения, а высокая дифракционная эффективность призвана минимизировать потери излучения при многократном отражении от поверхности ДР.

### Структурная схема

Принцип получения сверхмощных лазерных импульсов заключается во временном сжатии исходного, протяженного во времени импульса до ультракоротких значений (до 10–13–10–15 с) при сохранении средней мощности [2]. Сжатие может осуществляться разными методами, в основе которых лежит принцип использования аномальной дисперсии. На практике наиболее применяемыми являются компрессоры на дифракционных решетках.

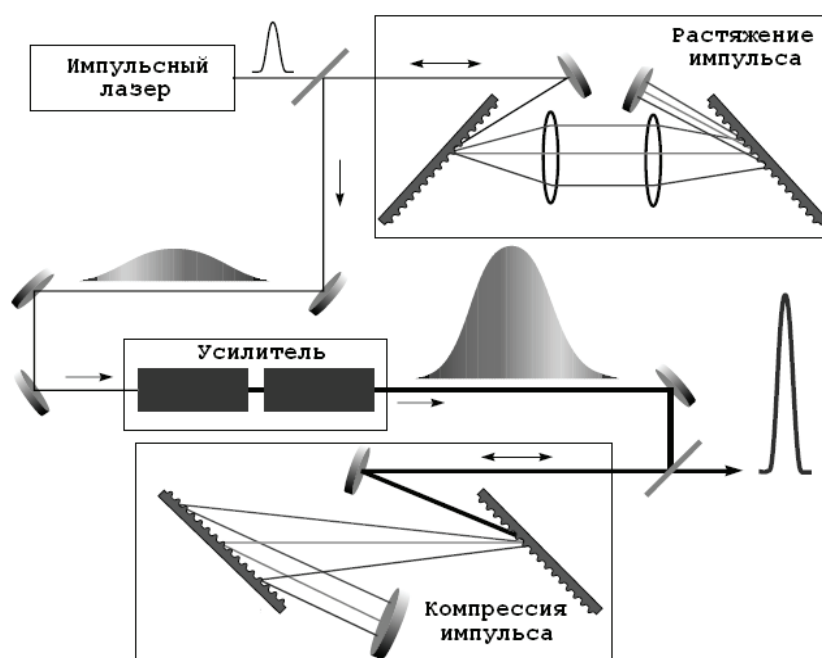


Рисунок 1.

Принципиальная схема лазера с компрессией импульсов

### Показатели качества

За рубежом давно ведутся работы по созданию производства крупногабаритных голографических дифракционных решеток с высокой лучевой стойкостью (Ливерморская лаборатория, Wasatch Photonics (США), HORIBA Jobin Yvon (Франция)). При этом достигнуты следующие предельные значения характеристик ДР:

- габариты: до 1 метра,
- дифракционная эффективность: до 92%,



– лучевая стойкость до 2,7 Дж/см<sup>2</sup>.

Однако эти характеристики достигаются на отдельных уникальных образцах и одновременно на одном образце не реализуются. Дифракционные решетки такого типа США не поставляют в другие страны (military product), в т.ч. в Европу и Россию.

В настоящее время российским разработчикам лазерной техники необходимы ДР с параметрами:

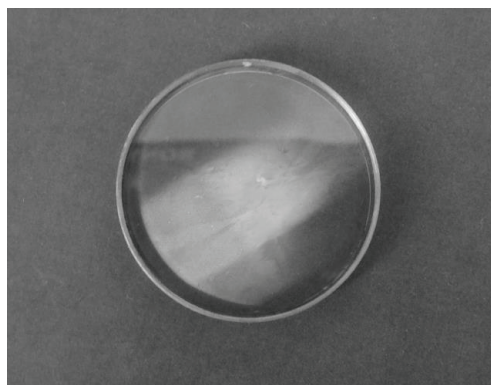
- габариты: до 500×500 мм,
- дифракционная эффективность: > 95%,
- лучевая стойкость: > 4 Дж/см<sup>2</sup>.

АО «НПО ГИПО» на протяжении почти 60 лет занимается разработкой и серийным производством спектроскопических и лазерных ДР. Нарботанный опыт позволил коллективу предприятия взяться за решение задачи разработки ДР для компрессии лазерных импульсов. Проблема имеет два значимых аспекта: 1) разработка конструкции и технологии изготовления дифракционной структуры, обладающей одновременно высокой лучевой стойкостью и высокой дифракционной эффективностью; 2) разработка голографической установки, позволяющей регистрировать голограммы большого формата.

АО «НПО ГИПО» обладает необходимыми помещениями, голографическими лабораториями, творческим коллективом. В течение последних трех лет проведен анализ литературы и теоретические исследования, позволившие разработать методики оптимизации лазерных компрессоров и параметров ДР для них, разработаны проекты технических заданий на технологическое оборудование для получения крупногабаритных ДР, определены потенциальные заказчики, разработаны варианты конструкций ДР с высокой лучевой стойкостью, получены первые экспериментальные образцы ДР, ведется работа по созданию измерительных стендов для контроля их технических характеристик.

В настоящее время АО «НПО ГИПО» достигнуты следующие технические характеристики ДР на малоразмерных подложках:

- лучевая стойкость: 2,5 Дж/см<sup>2</sup>,
- дифракционная эффективность на длине волны 1064 нм: 92 %.



**Рисунок 2.**

ДР с частотой 1640 нм с повышенной лучевой стойкостью, оптимизированная для работы с излучением  $\lambda=1064$  нм

### **Объем инвестиций**

Разработка конструкции ДР для компрессии лазерных импульсов и изготовление малоразмерных опытных образцов ведется АО «НПО ГИПО» за счет собственных средств. Изготовление ДР большого формата требует внедрения в технологический процесс «чистых помещений», приобретения нового технологического оборудования и специальной оснастки.

На сегодняшний день объем необходимых инвестиций оценивается в 191 млн. рублей на 3 года. Эти средства необходимы для подготовки специализированного участка «чистых» комнат с замкнутым циклом изготовления ДР, приобретения установки нанесения фоторезиста, вакуумных установок для нанесения диэлектрических материалов, их плазмо-химического и ионного травления, комплектующих для измерительных стендов, специальной оснастки, подложек, материалов и химических реактивов, а также оплату труда непосредственных исполнителей.

Срок окупаемости проекта – 4 года. Первые прибыли от продажи опытных образцов проект начнет приносить уже в течение первого года с момента начала финансирования.

### **Заключение**

Конструкции ДР решеток для компрессии лазерных импульсов имеют принципиальные отличия от обычных спектроскопических, что обуславливает применение иного технологического оборудования и технологических процессов для их изготовления. Разработка технологии производства такого класса ДР позволит решить проблему импортозамещения для отечественных разработчиков мощных лазерных систем, таких как: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров; ИПФ РАН, г. Нижний Новгород; ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ», г. Снежинск; ИСЗФ СО РАН, ИОА СО РАН и многих других, потребность которых оценивается в несколько десятков штук в год, а также позволит выйти на международный рынок, емкостью несколько сотен решеток в год.

Стоимость одной ДР для лазерного компрессора импульсов, в зависимости от характеристик, варьируется в пределах от 0,5 до 20 млн. рублей.

### **Список литературы:**

1. И.В.Яковлев. Стретчеры и компрессоры для сверхмощных лазерных систем. *Квантовая электроника* **44**, № 5, стр. 393-414, (2014).
2. С.А. Семиков. *Методы компрессии лазерных импульсов*. Учебно-методический материал. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, (2011).

# ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

**Новиков А.Г., Денисов И.Г., Иванов В.П., Шерстюков О.Н.,\*  
Латыпов Р.Р.\***

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт  
прикладной оптики», г. Казань, Россия

\*Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

Организация инновационной деятельности в оптико-электронном приборостроении

Инновационный подход к системе 3D автоматизированного проектирования оптико-электронных систем позволяет проводить анализ в привязке к конструкции разработанной системы электромагнитной и тепловой совместимости, компоновку, размещение, трассировку, многовариантный анализ и многокритериальную параметрическую оптимизацию проектных решений ее электронных модулей, что существенно снижает временные и финансовые затраты на разработку оптико-электронной системы.

Одной из проблем, возникающих при разработке оптико-электронных систем (ОЭС), является проблема компоновки и согласования электронных модулей, входящих в состав ОЭС. При разработке конструкции ОЭС электронные модули проектируются в качестве самостоятельных узлов и блоков. В процессе изготовления образцов ОЭС возникают проблемы электромагнитной и тепловой совместимости, что приводит к значительному увеличению сроков выпуска первых образцов. Это связано, в первую очередь, с тем, что к проблемам электромагнитной (ЭМС) и тепловой совместимости электронных модулей в большинстве случаев можно подойти только эмпирически, что увеличивает временные и финансовые затраты.

Неуклонное увеличение быстродействия и степени интеграции элементной базы требует совершенствования методов проектирования и конструирования электронных модулей с учетом ужесточающихся требований к ЭМС, электрическим параметрам межсоединений и помехоустойчивости элементов. Дальнейшее развитие методов проектирования требует разработки более совершенных математических моделей разрабатываемых систем, основанных на принципах анализа электромагнитных процессов, теории электромагнитного поля и тепловых режимов работы устройств.

Автоматизация проектирования служит важным фактором сокращения сроков и повышения качества проектирования, снижения удельного веса экспериментальных исследований. Системы автоматизированного проектирования (САПР) электронных модулей применяются на всех этапах и уровнях проектирования, но в то же время совместное использование программных продуктов от различных производителей зачастую оказывается невозможно, ввиду использования различных форматов представления данных.



В связи с этим, важное значение приобретает проблема интеграции САПР различных производителей для разработки как электронных модулей, так и конструкции ОЭС, и интеграции программных продуктов, позволяющих проводить численные расчеты электронных модулей на электромагнитную совместимость, компоновку схем электронных средств по модулям, размещение элементов на печатных платах и трассировку межсоединений в единый комплекс проектирования.

Разработка системы 3D проектирования ОЭС, учитывающей решение вопросов ЭМС и обеспечение тепловых режимов работы электронных модулей, позволит выйти на новый уровень проектирования оптико-электронных систем, обеспечить уменьшение времени на разработку ОЭС.

Для решения этой задачи выполняется работа по освоению и отладке технологии сквозного проектирования с целью ее последующего внедрения на предприятия холдинга «Швабе». Для проведения расчетов ЭМС с использованием САПР «Advanced Design System» разработки Keysight Technologies отработана технология конвертации PCB-проектов и проведены первые расчеты ЭМС, а также поставлен эксперимент по оценке влияния помех на сигнальные линии. Выполнено сравнение результатов расчетов и экспериментальных данных.

## **О РАЗВИТИИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

**Архипов С.А., Григорьева О.В.\*, Марков А.В.\*, Мироничев В.А.\*\***

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия

\*Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург,

\*\*Госкорпорация «Роскосмос», г. Москва

Оптико-электронная аппаратура дистанционного зондирования Земли

Рассмотрены результаты эксплуатации гиперспектральной аппаратуры космического комплекса «Ресурс-П». Поставлены задачи дальнейшего развития наземного программного обеспечения обработки гиперспектральной информации и предложения по совершенствованию характеристик гиперспектральной аппаратуры для перспективного космического комплекса.

В 2012 году Красногорский завод совместно с НПП ОПТЭКС (филиал ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс») создал гиперспектральную аппаратуру ГСА-РП [1], обеспечивающую в настоящее время съемку Земли в составе космических комплексов (КК) «Ресурс-П» № 1 (2013 г.), № 2 (2014 г.), № 3 (2016 г.). Основные технические характеристики ГСА-РП приведены в таблице 1.

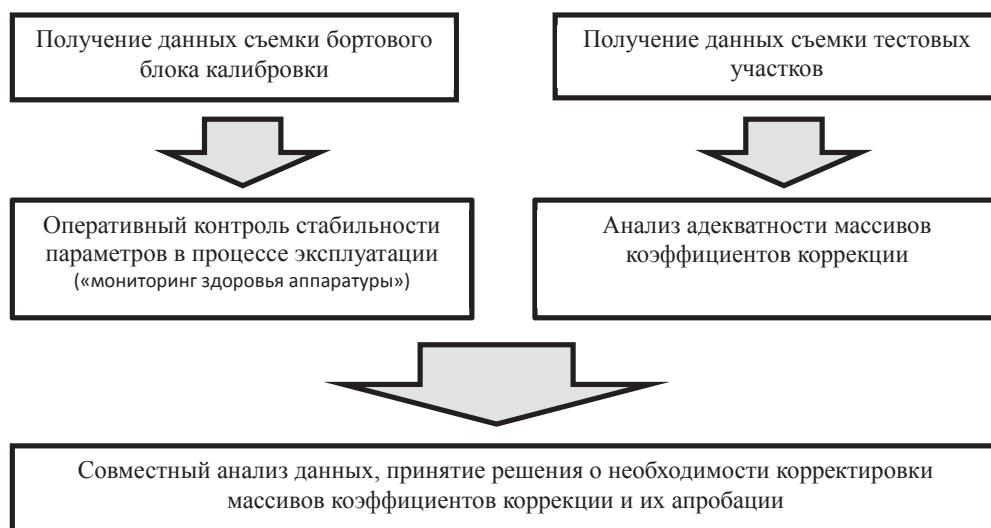
**Таблица 1.** Основные технические характеристики ГСА-РП

Характеристика	Значение
Полоса захвата, км	30
Размер проекции пикселя, м	30
Спектральный диапазон, мкм	0,40 - 0,96
Число спектральных каналов	130
Спектральное разрешение, нм	4,5 - 6,5
Отношение сигнал/шум	>200
Разрядность квантования сигнала, бит	14
Среднеквадратическая погрешность измерения СПЭЯ, %	5,0
Среднеквадратическая погрешность аттестации фотограмметрических параметров, угл. с	5,0
Информационный поток, Мбит/с	552
Масса, кг	<150

Для устранения искажений данных ДЗЗ, обусловленных несовершенством ГСА-РП, на этапе настройки аппаратуры проводится ее наземная фотограмметрическая и радиометрическая калибровки. Цель фотограмметрической калибровки – определение поэлементного углового положения линии визирования каждого пикселя относительно приборной системы координат ГСА-РП. Полученные аттестованные фотограмметрические параметры позволяют исключить геометрические искажения данных ДЗЗ при их наземной геометрической коррекции. Цель радиометрической калибровки – определение радиометрических параметров (спектральная чувствительность, градуировочные характеристики, неравномерность сигнала при визировании равнояркой поверхности и др.) ГСА-РП и обеспечение прослеживаемости данных калибровки к государственному эталону. Радиометрическая калибровка образцов ГСА-РП проводилась на Государственном эталоне спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) ГЭТ 179-2010 ФГУП ВНИИОФИ, что обеспечило предельно высокую радиометрическую точность аппаратуры.

Для подтверждения сохранности радиометрических параметров ГСА-РП в эксплуатации в составе аппаратуры предусмотрен блок радиометрической калибровки с опорным источником излучения. В ходе летных испытаний и регулярно в штатной эксплуатации ГСА-РП проводятся процедуры замещающей калибровки по наземным радиометрическим полигонам. Бортовые и замещающие калибровки проводятся параллельно, что иллюстрирует рисунок 1.

Анализ качества и востребованности гиперспектральной информации (ГСИ), получаемой ГСА-РП, проводился в период 2014 -15 гг. на заседаниях рабочей группы по вопросам отработки технологий целевого применения гиперспектральной аппаратуры КК «Ресурс-П». В докладах участников рабочей группы (НЦ ОМЗ, АО «РКЦ «Прогресс», РРГТУ, ОКБ «Спектр», МФТИ, «Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского и др.) отмечена практическая ценность и примеры тематического использования ГСИ [2,3].



**Рисунок 1.**

Структура работ по актуализации радиометрических параметров ГСА-РП

В то же время сегодня имеется ряд вопросов, без решения которых эффективное тематическое использование гиперспектральной информации затруднено. Так в рамках КК «Ресурс-П», в состав которого входит и ГСА-РП и наземный комплекс обработки, необходимо:

- завершить работ по минимизации погрешностей канальной сшивки спектров и коррекции «голубой» области;
- завершить согласование и отработку регламентов проведения технологических режимов и анализа данных, обеспечивающих периодический контроль стабильности параметров на всём интервале эксплуатации КК;
- разработать и провести экспериментальную отработку регламента проведения замещающих калибровок.

Также следует отметить дальнейшие работы [4] по совершенствованию отечественной гиперспектральной аппаратуры и наземного программного обеспечения (НПО) обработки ГСИ:

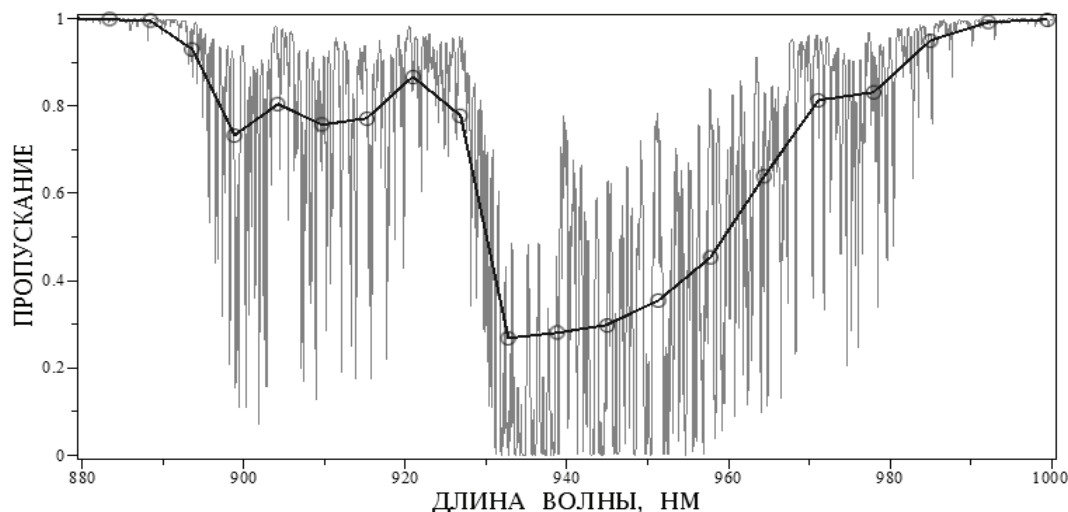
- создание НПО, обеспечивающего процедуры периодических проверок и промежуточного контроля ГСА, проведение работ по интеркалибровке КК «Ресурс-П», оптимизацию исходных данных для полетного задания съемки, учитывающую прогнозируемые параметры атмосферы и коэффициенты спектральной яркости планируемых к съемке сюжетов, апостериорную коррекцию ГСИ с учетом фактических параметров атмосферы;
- создание ГСА на основе зеркальной дифракционной оптики с рабочим спектральным диапазоном, включающим коротковолновую ИК спектральную область.

Финансирование и реализация работ по указанным направлениям позволит повысить информативность ГСИ и обеспечить тематических потребителей информации ДЗЗ конкурентоспособной ГСИ раскрыть инновационный потенциал ГСА.

При практическом применении гиперспектральной аппаратуры возникает естественный вопрос: а что делать с этим огромным объемом спектральной видеоинформации, как выбрать из «гиперкуба» существенное? Ответ на этот вопрос лежит в постанов-

ке заданного класса задачи наблюдения и требует создания алгоритмов и программного обеспечения, решающих задачу «вытяжки» существенной информации из полученного «гиперкуба» и ее отображении в цветовой гамме, удобной для восприятия человеком.

Потенциальные возможности тонкой спектральной идентификации с помощью гиперспектральной аппаратуры демонстрирует рисунок 2.



**Рисунок 2.**

Пропускание атмосферы при наблюдении с помощью ГСА-РП.  
(Авторские права на слайд - Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
oleg-postylyakov@yandex.ru)

Пропускание в полосе поглощения воды: истинное (зеленая кривая) и кажущееся (красная ломаная) при наблюдении прибором ГС-РП. Кружками отмечен сигнал отдельных пикселей прибора. Из рисунка мы можем наблюдать совпадение усредненного хода изменения спектрального пропускания атмосферы и данных ГСА-РП, которое можно трактовать как спектральную «генерализацию», т.е. отбрасывание лишней, избыточной информации. С другой стороны это несовпадение двух кривых можно рассматривать как «недобор» спектрального пропускания прибора. Т.о. противоречивый вопрос о достаточности спектральной и пространственной точности (чем точнее аппаратура, тем она сложнее) разрешается на том уровне требований к погрешности, на котором получаемая информация ДЗЗ и имеющееся программное обеспечение обработки информации ДЗЗ позволяют решать требуемый класс задач ДЗЗ.

Среди известных задач ДЗЗ [5] можно выделить следующий, далеко не полный перечень задач, для которого наряду с пространственной информацией актуально наличие подробной спектральной информации:

- составление карт пространственного распределения различных видов земель, оценки состояния посевов (в т.ч. сорняков и наркосодержащих растений),
- картирование открытых грунтов и влажных и засоленных почв, состояния водоемов (оценка загрязнения, картирование ареалов обитания водных растений, донного покрова, анализ мутности воды, состояния прибрежных зон, оценка заболоченных мест...),

- картирование лесов (оценка состояния древостоя, составление карт распределения пород деревьев, определение количественных параметров запасов древесины, оценка ареалов распространения вредителей...),
- изучение экологического состояния, в том числе выявление и локализации дефектов нефте- и газопроводов, обнаружение нефтяной пленки,
- изучение геологии и минералогии подстилающей поверхности и разведки полезных ископаемых,
- выявление ареалов распространения культур микроорганизмов,
- обнаружение и локализация различного типа мин и специальных объектов (например, лагеря террористов, расположенного в густом лесу, по результатам аэросъемки с большой высоты),
- картирование температурного распределения в городах, потерь тепла в зданиях,
- мониторинг популяций диких животных,
- зондирование атмосферы, изучение биохимического анализа состава атмосферы.

#### **Список литературы:**

1. С.А.Архипов, А.И.Бакланов, В.М. Линько. *Исследование Земли из космоса*, 2014, №3. – С. 1 -12.
2. О.В.Григорьева, Д.В. Жуков, А.В. Марков, В.Ф.Мочалов. *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 07. С. 553-559
3. <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1240171>
4. С.А. Архипов и др. *Гиперспектральная аппаратура для космического аппарата «Ресурс-П»: направления модернизации и перспективы развития // Сб. тезисов докладов НТК «Гиперспектральные приборы и технологии». ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева». 2013 г. - с. 43-44.*
5. *«Классификатор тематических задач оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли»*, редакция 6, - Иркутск, Москва, 2002 г.

# РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ – КЛЮЧ К ПОСТРОЕНИЮ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ

Архипов С.А., Карпунин Д.Н.\*, Саприцкий В.И. \*\*, Тихонычев В.В.\*\*\*

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия

\* ФГУП ЦНИИмаш, г. Москва, Россия

\*\* ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, Россия

\*\*\* АО «Российские космические системы» НЦ ОМЗ, г. Москва, Россия

Оптико-электронная аппаратура дистанционного зондирования Земли

Предложен комплекс инновационных проектов по радиометрической калибровке бортовой оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ и валидации получаемых данных, реализация которых позволит создать отечественную систему метрологического обеспечения радиометрических измерений оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ с прослеживаемостью к национальным эталонам и обеспечением гармонизации получаемых данных.

В соответствии с «Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года» [1], главной целью создания российской орбитальной группировки космических средств (ОГ КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является максимальное удовлетворение потребностей национальной экономики и обеспечение конкурентоспособности в области ДЗЗ. От качества информации, получаемой отечественной оптико-электронной аппаратурой (ОЭА) ДЗЗ зависит:

- эффективность решения социально-экономических и научных задач страны;
- конкурентоспособность этой информации и производной продукции, как на мировом, так и на внутреннем рынке космических услуг;
- уровень участия России в международных проектах, и, в первую очередь, в таком масштабном проекте как создание Глобальной системы наблюдения Земли (ГСНЗ), осуществляемом международной Группой по наблюдениям Земли, в которую входит Россия.

Перспективы повышения точности бортовой аппаратуры, развития и интеграции геоинформационных систем, построения ГСНЗ определяются возможностью совмещения и комплексирования информации ДЗЗ (ИДЗЗ), получаемой существующими космическими комплексами (КК) ДЗЗ в различных временных интервалах и отличающихся условиях съемки. Ключ решения этой глобальной технологической задачи – обеспечение прослеживаемости ИДЗЗ к эталону единицы спектральной плотности энергетической яркости – радиометрическая калибровка бортовой оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) и валидация получаемых данных [2]. По умолчанию предполагается, что в состав ОЭА входит наземное программное обеспечение, с помощью которого осуществляется радиометрическая коррекция ИДЗЗ, при этом требований к достоверности получаемой информации не предъявляется.

По существу калибровка – это процесс определения действительных значений характеристик ОЭА путем измерения ее отклика на известный входной сигнал, выполняемый специалистами эксплуатирующей организации и главного конструктора ОЭА.



Различают предстартовую (наземную) и послестартовую (бортовую и замещающую) радиометрическую калибровку ОЭА [3]. Валидация – это процесс оценки независимыми средствами и независимой организацией возможности применения информации, получаемой с помощью ОЭА, для решения конкретной задачи, причем информационным продуктом является пакет окончательно обработанных данных, связанный с различными измеряемыми геофизическими параметрами, которые являются объектом специальных исследований. Геофизические параметры – это изменяющаяся окружающая среда, включая поверхность Земли, атмосферу и космическое пространство. Верификация ИДЗЗ выполняется путем сравнительного анализа орбитальных данных с метрологически обеспеченными данными наземных, воздушных и космических измерений [4]. Валидация ИДЗЗ определяет возможность применения полученных и обработанных данных для определения лесных пожаров, состояния климата и т.д. Процессы калибровки и валидации обеспечивают достоверность информации ДЗЗ на протяжении всего срока эксплуатации ОЭА, основанное на документально подтвержденной количественной оценке единства измерений в соответствии с международно признанными эталонами физических величин.

Практическая реализация процессов калибровки и валидации требует построения Системы метрологического обеспечения ОЭА ДЗЗ, в состав которой должны войти:

- национальный эталон и государственная поверочная схема;
- вторичные (рабочие) эталоны;
- средства передачи единицы величины;
- средства наземной калибровки;
- средства полётной калибровки;

– комплекс нормативно-методических документов в области метрологического обеспечения аппаратуры ДЗЗ.

Осознание аспекта системности в обеспечении качества ИДЗЗ организациями и предприятиями, участвующими в развитии ОГ ДЗЗ, позволило в 2015 году разработать «Дорожную карту по созданию отраслевой системы метрологического обеспечения аппаратуры ДЗЗ» [5]. В основе Плана мероприятий Дорожной карты, лежит комплекс инновационных проектов (см. таблицу 1), направленных на повышение качества и конкурентоспособности ИДЗЗ.

Приведем оценку эффективности комплекса ИП. Для этого примем следующие исходные данные. Срок выполнения комплекса ИП составляет 8 лет. Пусть начиная с 2017 года по 2020 год производится ежегодное инвестирование в комплекс ИП в объеме в объеме 1 млрд.руб. Последующие четыре года (с 2021 по 2024 год) за счет реализованных мероприятий ИП (созданных приборов, оборудования, программно-методического и нормативного обеспечения), ИДЗЗ будет продаваться в объемах:

- 80% «импортозамещение» иностранной ИДЗЗ на российском рынке ИДЗЗ;
- выход России на 10% международного рынка ИДЗЗ.

Если также принять ориентировочные, указанные в таблице 2 характеристики международного и российского рынков ИДЗЗ, а также ставку дисконтирования 15%, то получаем следующие оценки эффективности комплекса ИП:

- чистая приведенная стоимость  $NPV = 6,61$  млрд.руб.
- внутренняя норма доходности  $IRR=60\%$

Калибровка и валидация ОЭА в соответствии с общепризнанными требованиями откроют также возможности достойного участия России в международном рынке ОЭА и получение дополнительных доходов.

**Таблица 1.**  
Иновационные проекты (ИП)

№	Наименование ИП	Основные исполнители	Планируемый результат ИП
1	Создание эталонного радиометрического комплекса для калибровки перспективной аппаратуры ДЗЗ	ПАО КМЗ ВНИИОФИ	Обеспечение радиометрической калибровки ОЭА ДЗЗ с апертурой до 1000 мм в диапазоне спектра от 0,35-2,5 мкм
2	Разработка бортового источника излучения на фазовых переходах веществ	ЦНИИмаш ВНИИОФИ	Обеспечение бортовой калибровки аппаратуры ДЗЗ с прослеживаемостью к национальным эталонам
3	Разработка, изготовление, и производство приборного ряда бортовых эталонных изображающих спектрорадиометров	ПАО КМЗ	Обеспечение прослеживаемости ИДЗЗ к Государственным первичным эталонам и возможности оперативной оценки характеристик ОЭА ДЗЗ и средств валидации за счет непосредственных проверок их в условиях эксплуатации по СПЭЯ на верхнем уровне атмосферы Земли
4	Разработка, изготовление и производство (выбор) наземных тест-объектов в различных спектральных диапазонах для исследования погрешности измерений аппаратуры ДЗЗ [6]	НЦ ОМЗ (АО РКС)	Исследование отражающих и излучающих свойств тест-объектов в спектральных диапазонах целевой аппаратуры КК ДЗЗ (видимом, инфракрасном, радиолокационном), создание тест-объектов и их математических моделей изменения их параметров, алгоритмов оценки их значений и погрешностей.
5	Создание стендов для измерения излучательной способности в условиях вакуума и низкофонового излучения	ЦНИИмаш ВНИИОФИ АО РКС	Возможность проведения новых измерений для повышения точности аппаратуры ДЗЗ и исследования излучательных и отражательных характеристик объектов измерений
6	Разработка эталонных средств приема и передачи излучения в диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного спектра в условиях космического пространства	ВНИИОФИ	Получение новых источников излучения и передачи им единицы величины
7	Развитие источников и приемников излучения для исследования свойств атмосферы и отражающих характеристик объектов Земли и космического пространства	ЦНИИмаш	Исследование источников погрешности измерений, создание новых эталонов для подтверждения соответствия приборов требованиям назначения
8	Формирование комплекса нормативных документов по обеспечению единства измерений в области ДЗЗ	ЦНИИмаш ВНИИОФИ ПАО КМЗ НЦ ОМЗ	Нормативно-правовая база, методическая документация по метрологическому обеспечению параметров ОЭА/ИДЗЗ на протяжении всего жизненного цикла ОЭА
9	Создание аппаратно-программных комплексов автоматизированного измерения, сбора и обработки данных и оценки характеристик тест-объектов, соответствующих моменту космической съемки [7]	НЦ ОМЗ	Повышение точности измерений при ДЗЗ. Обеспечение прослеживаемости измерений при валидации результатов ДЗЗ к Государственным первичным эталонам на местах эксплуатации средств валидации. Обеспечение возможности оперативной оценки характеристик средств ДЗЗ за счет развертывания оперативных наземных полигонов и автоматизации определения их характеристик, синхронных с космической съемкой

**Продолжение таблицы 1.**

10	Разработка и создание сети приборных комплексов измерения параметров состояния атмосферы и аппаратно-программных комплексов для повышения точности определения ее оптических характеристик	НЦ ОМЗ	Достижение погрешности радиометрических измерений на верхней границе атмосферы в оптическом диапазоне на уровне 1...3%
----	--	--------	--

**Таблица 2.**

**Характеристики рынков ИДЗЗ**

Рынок ИДЗЗ	Объем рынка, млрд. руб.	Ежегодный прирост рынка, %	Рентабельность продаж ИДЗЗ, %	Ежегодный доход от продаж российской ИДЗЗ, млрд. руб.			
				2021	2022	2023	2024
Российский	5,0	40	10	0,88	1,07	1,30	1,58
Международный	100,0 (1400 млн.\$)	20	10	1,18	1,24	1,29	1,35
<b>Итого</b>				2,06	2,31	2,59	2,93

**Список литературы:**

1. gisa.ru>file/file766.doc
2. QA4EO-QAEO-GEN-DQK-001 A guide to establish a Quality Indicator on a satellite sensor derived data product.
3. С.А. Архипов. *Научно-технический журнал «Контенант»*, 2012, №1. – С. 24-26.
4. В.А. Селин, А.И. Бочарников, В.В. Тихонычев *Аэрокосмический курьер*, 2011. № 6.
5. Д.Н. Карпунин. *Принципы создания и направления развития отраслевой системы метрологического обеспечения аппаратуры дистанционного зондирования Земли // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности»: Тезисы докладов. - Дом отдыха «Селигер», о. Городомля, 2015. - С. 30-32.*
6. А.А. Емельянов, А.И. Бочарников, В.В.Тихонычев, А.П. Долженко. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. М.: АО «РКС», 2015. – С. 102-118.*
7. В.В. Тихонычев, Жиличкин А.Г., В.П. Коваленко, С.А. Ревин. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные технологии. М.: АО «РКС», 2015. – С. 118-130.*
8. gisa.ru>file/file2299.doc

**THE KEY TO BUILD GLOBAL EARTH OBSERVATION: RADIOMETRIC CALIBRATION AND VALIDATION OF ON-BOARD EQUIPMENT**

**Arkhipov S.A, Karpukhin D.N. \*, Saprickiy V.I.\*\*, Tikhonychev V.V.\*\*\***

РАО «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

\*FSUE «TsNIImash», Moscow, Russia

\*\* FSUE «VNIIOFI», Moscow, Russia

\*\*\* JSC «Russian Space Systems» NTs OMZ, Moscow, Russia

A large catadioptric telescopes

A set of innovative projects for radiometric calibration of airborne electro-optical Earth remote sensing equipment and validation of the data is suggested. Implementation of these projects will allow to create a domestic system of metrological support of radiometric measurements of optical-electronic equipment remote sensing with traceability to national standards and ensuring the harmonization of the data.

# РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ С УНИФИЦИРОВАННЫМИ РАЗЪЕМНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ГОЛОВКАМИ

**Кузьмичев А.М., Шиляев А.Ю.**

Филиал АО «Ракетно-космический центр «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС»,  
г. Москва, Россия  
Волоконно-оптическая связь

В работе представлены волоконно-оптические передающие модули с унифицированными разъемными лазерными головками, имеющими высокий уровень выхода годных изделий с улучшенными техническими характеристиками по сравнению с зарубежными аналогами, разработанные в НПП «ОПТЭКС».

Волоконно-оптические передающие модули широко применяются в целевой аппаратуре ряда комплексов систем приема и преобразования информации (СППИ) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и в других комплексах бортовой аппаратуры.

В настоящее время заказчиками волоконно-оптических передающих модулей являются следующие фирмы:

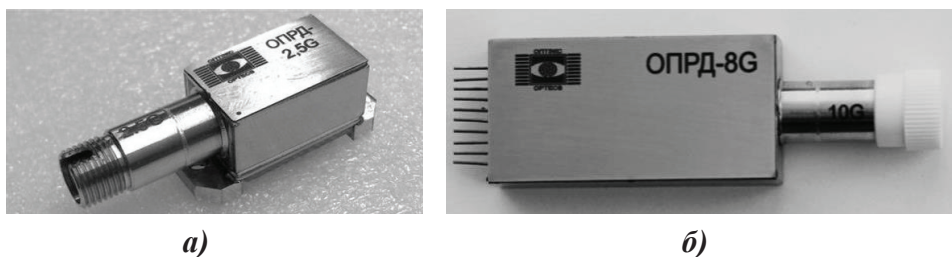
- АО «НИИ ТП»;
- АО «НИИ «Субмикрон»;
- ОАО Концерн ВКО «Алмаз-Антей»;
- ОА РТИ им. Минца;
- АО «НПК «СПИ»;
- АО «Концерн радиостроения «Вега».

Волоконно-оптические передающие модули (ОПРД) производят преобразование входного информационного электрического сигнала в оптический для передачи через волоконно-оптические линии связи. Модуль имеет дифференциальный вход для приема сигналов от внешних устройств и содержит в своем составе схемы температурной компенсации, управления усилением и другие, требуемые для устойчивой работы модуля.

Корпус волоконно-оптических передающих модулей выполнен из нержавеющей стали. Основным элементом модулей являются отечественные унифицированные волоконно-оптические разъемные головки, разработанные специалистами НПП «ОПТЭКС» совместно с сотрудниками фирмы «LasersCom» (Республика Беларусь).

В настоящее время разработаны и изготовлены опытные партии нескольких типов волоконно-оптических передающих модулей с улучшенными техническими характеристиками, приведенными в таблице 1, внешний вид модулей показан на рис. 1.

Технические характеристики ряда разработанных специалистами НПП «ОПТЭКС» компонентов ВОЛП находятся на уровне мировых достижений, что подтверждается наличием патентов РФ на изобретения. Стоит отметить, что в настоящее время в России волоконно-оптические разъемные унифицированные головки собственной разработки производит только НПП «ОПТЭКС».



**Рисунок 1.**

Внешний вид волоконно-оптических передающих модулей: а) ОПРД-2,5G, б) ОПРД-8G

**Таблица 1.**

Параметр	ОПРД-2,5G	ОПРД-2,5G с подкреплением	ОПРД-8G
Напряжение питания, В	3,3	3,3	3,3
Ток потребления, мА	100	100	200
Скорость потока, Гбит/сек	2,5	2,5	8
Максимальная мощность излучения, мВт	от 0,5 до 2	от 2 до 5	от 4 до 10
Вероятность ошибок	$10^{-10}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$
Габаритные размеры, мм	43,1x13x11	45,3x13,7x13	67x20x11
Масса, г	15	20	30
Рабочий диапазон излучения, нм	1310 ± 10	1310 ± 10	1310 ± 10
Диапазон рабочей температуры, °С	-40...+60	-50...+60	-40...+60

## **THE DEVELOPMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF FIBER-OPTICS TRANSMITTER MODULES WITH UNIFIED DETACHABLE LASER HEAD**

**Kuz'michev A.M., Shilyaev A.Yu**

Branch of Joint-Stock Company Space-Rocket Center «Progress» - Research and Production Enterprise «OPTECS», Moscow, Russia  
A large catadioptric telescopes

The paper presents the fiber-optics transmitter modules with unified detachable laser heads with improved performance, developed enterprise «OPTECS».

# УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС СБОРА, ПЕРЕДАЧИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ОТ УДАЛЕННЫХ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

Землянов М.М., Качурин А.С., Мамин А.В., Пименов А.И.,  
Спиридонов Е.П., Кузнецов В.С.

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия  
Прикладная оптика и телекоммуникационные системы

Рассматривается универсальный информационно-измерительный комплекс нового поколения, позволяющий получать, обрабатывать и отображать информацию с удаленных датчиков различных типов. Комплекс опрашивает до 960 датчиков и передает информацию по волоконно-оптическому каналу связи с объекта, удаленного на расстояние до 5000 м, в диспетчерский пункт.

На примере российских ракетно-космических комплексов (РКК) семейства «Ангара» представлены результаты и преимущества построения системы наземных измерений (СНИ) для проведения предстартовой подготовки на основе универсального волоконно-оптического комплекса сбора, передачи и обработки информации (далее ВОКСНИ).

Последними тенденциями в развитии современных космических ракет-носителей (РН) коммерческого назначения являются модульность архитектуры РН и увеличение массы полезной нагрузки, выводимой на орбиту. Кроме того, к современным РН предъявляются высокие требования с точки зрения надежности и точности проведения операций предстартовой подготовки. Для обеспечения вышеизложенных требований РН современного РКК оборудован большим числом датчиков разных типов. Показания датчиков непрерывно контролируются СНИ как в период проведения предстартовой подготовки РН к пуску, так и во время сборки и испытаний РН на заводе-изготовителе.

Основные параметры ВОКСНИ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры ВОКСНИ

Параметр	Значение
Максимальное количество датчиков	960
Количество преобразователей ПСД	30
Погрешности измерения: - температуры - давления - пульсации давления - влажности	$\pm 0,1$ К $\pm 1,5$ % $\pm 2,5$ % $\pm 1$ %
Частота опроса датчиков: - температуры - давления - пульсации давления - влажности	10 Гц 5 Гц 600 Гц 1 Гц
Рабочий температурный диапазон	от $-50$ до $+50$ °С
Максимальная дальность передачи информации	5000 м
Ресурс работы	30 000 ч
Вероятность безотказной работы за 240 ч	0,998
Вид приемки	«5» по РК-98



ВОКСНИ для РКК семейства «Ангара» обеспечивает:

- контроль параметров различных датчиков;
- обработку и представление значений физических величин, поступающих с бортовых датчиков, на дисплее СПЭВМ в реальном масштабе времени при заводских испытаниях, транспортировке, заправке, предполетной подготовке РН;
- сохранение значений всех параметров, дополненных временной привязкой, в резервированном дисковом массиве;
- передачу значений в смежные системы по дублированному каналу связи типа RS-485 для дальнейшей обработки;
- опрос до 960 датчиков с частотой до 600 Гц;
- необходимую информацию для принятия решения о готовности РН к пуску.

Как видно из рисунка 1 ВОКСНИ состоит из наземной и бортовой частей, информационный обмен между которыми происходит с помощью магистральной волоконно-оптической линии связи (МВОЛС).

Бортовая часть состоит из шести кольцевых сегментов бортовой кольцевой волоконно-оптической линии связи (БКВОЛС), замкнутых на оптическом коммутаторе (ОК). Каждый сегмент включает в себя до 6 преобразователей сигналов датчиков (ПСД), каждый из которых в свою очередь может опрашивать до 32 датчиков. БКВОЛС представляет собой два (основной и резервный) встречно включенных кольцевых волоконно-оптических канала передачи данных, обеспечивающих повышенную надежность и функциональность ВОКСНИ.

Наземная часть включает в себя устройство сопряжения с наземной аппаратурой (УСН), устройство сбора, обработки и предоставления информации (УСОПИ) и МВОЛС. МВОЛС представляет собой 8-ми канальный оптический кабель со специальными концевыми соединителями. Непосредственно задействованы четыре волокна кабеля, а оставшиеся четыре – резерв. Скорость передачи данных в МВОЛС оптимизирована под количество опрашиваемых датчиков и алгоритмы обработки сигналов и составляет 10 Мбит/с. Передаваемые данные кодируются с использованием сбалансированного кода типа Манчестер-2.

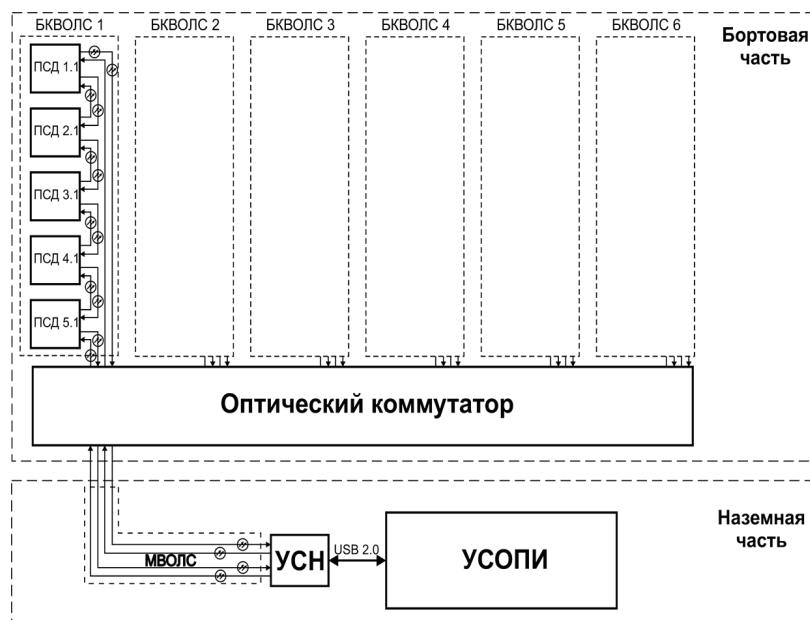
В комплексе также предусмотрена программная процедура диагностики системы, которая иницируется УСОПИК при включении и позволяет выявить неисправные сегменты схемы. При невозможности исправить неработающие сегменты в режиме опроса система переходит на опрос по резервной программно-аппаратной схеме.

В результате применения комбинированных методов повышения надежности, основанных на использовании как аппаратного резервирования, так и специализированных программных решений, прогнозируемая оценка вероятности безотказной работы комплекса составила 0,998 за 240 часов, что подтверждает эффективность предложенного подхода к обеспечению надежности сложных комплексов сбора и передачи информации.

В 2010 году завершено создание опытного образца комплекса, в 2011 году с положительным результатом проведены предварительные испытания опытного образца. В 2012 – 2013 годах на космодроме «Плесецк» успешно проведены автономные и комплексные испытания модификации изделия для монтажно-испытательного комплекса (МИК). В период с 2010 по 2013 годы проведены три успешных пуска с космодрома НАРО (Республика Корея) ракеты-носителя КСЛВ-1, первая ступень которой является универсальным разгонным модулем (УРМ) от РКК «Ангара». Предстартовая подготовка ракеты-носителя была обеспечена волоконно-оптическим комплексом передачи сборки

и представления информации ВОКСНИ-КСЛВ-1, который представляет собой упрощенный экспортный вариант комплекса ВОКСНИ-АНГАРА. В июне 2014 г. комплекс ВОКСНИ-АНГАРА обеспечил успешную предстартовую подготовку и пуск ракеты-носителя легкого класса «Ангара 1.2ПП», а в декабре 2014 г. – ракеты-носителя тяжелого класса «Ангара 5».

Успешно проведенные испытания ВОКСНИ [1,2] позволяют рассматривать варианты применения системы в таких областях как авиация, железнодорожный и водный транспорт, а также в разнообразных системах контроля и управления.



**Рисунок 1.**

Упрощенная блок-схема комплекса

#### Список литературы:

1. M.P. Ananiev, M.M. Ermak, M.M. Zemlyanov, A.S. Kachurin, V.S. Kuznetsov, A.V. Mamin, I.S. Mikheichev, A.I. Pimenov, E.P. Spiridonov, V.B. Shukilo., *Technical program of 15th international conference on Laser Optics*, p. 23 (2012).

2. М.П. Ананьев, М.М. Землянов, А.А. Казаков, А.В. Мамин, А.И. Пименов, И.С. Михайчев, Е.П. Спиридонов, А.С. Качурин, В.С. Кузнецов, В.Б. Шукайло, *Труды 10-й Российской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в системах связи и управления»*, с. 367-369, (2011).

## UNIVERSAL COMPLEX FOR DATA ACQUISITION, TRANSMISSION AND PROCESSING FROM REMOTE SENSORS OF VARIOUS TYPES

**M.M. Zemlyanov, A.S. Kachurin, A.V. Mamin, A.I. Pimenov, E.P. Spiridonov**

Polyus Research and Development Institute named after M. F. Stelmakh,  
Moscow, Russia

Next generation universal data measurement complex is reviewed. It allows to get, process and display readout from remote sensors of various types. Complex queries up to 960 sensors and transmit sensors' readout by fiber-optical circuits from remote object to control center, which is situated 5000 meters far.

# АКТИВАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Азарова В.В., Акишев Ю.С.\*, Голяева А.Ю., Грушин М.Е., Краснов  
В.И., Петряков А.В.\*, Сухов Е.В., Трушкин Н.И.\*

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

\* АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия

Электронно-оптическое приборостроение

В работе представлен метод упрочнения оптического контакта диэлектрических поверхностей с использованием плазменной активации. Показана возможность сборки резонаторов кольцевых лазеров с использованием данного метода, в том числе изготовленных из разнородных материалов.

## Введение

Одним из важнейших эксплуатационных параметров лазерных гироскопов (ЛГ) является срок их сохраняемости, то есть неизменность состава газовой смеси в течение всего срока их эксплуатации и хранения. Натекание в гироскоп таких примесей как кислород, водород и углеводороды существенно ограничивает срок его службы. Механически прочное и вакуумно-плотное соединение оптических деталей ЛГ является одной из серьезных технологических проблем при изготовлении.

Оптические детали ЛГ изготавливаются из материалов с малым коэффициентом термического расширения, среди которых находятся ситалл, зеродур и клиакерам (Clearceram-Z). В настоящее время общепринятым методом соединения оптических деталей ЛГ является технология оптического контакта (ОК) [1-3].

После механической полировки на контактирующих поверхностях остаются различные пленки толщиной в несколько атомных слоев, которые ослабляют межмолекулярное взаимодействие двух поверхностей и, тем самым, ухудшают качество их оптического контакта. Как показала практика, традиционная «мокрая» химическая чистка полированных поверхностей не устраняет полностью эти пленки, в связи с чем была поставлена задача поиска новых методов обработки оптических поверхностей перед их посадкой на оптический контакт.

В данной работе представлен новый метод упрочнения оптического контакта диэлектрических поверхностей лазерного гироскопа с использованием плазменной активации. Метод заключается в обработке оптических поверхностей струей холодной плазмы, формируемой газоразрядным источником плазмы на основе высокочастотного барьерного разряда в потоке аргона при атмосферном давлении. Поверхностная модификация различных материалов холодной плазмой при атмосферном давлении используется давно [4-6], однако применение холодной плазмы для упрочнения оптического контакта деталей в ЛГ предложено нами впервые.

## Структурная схема

Обработка поверхностей оптических деталей, изготовленных из ситалла марки СО

- 115М и клиакерам (Clearceram-Z), проводилась с использованием малогабаритного цилиндрического плазменного источника (рис. 1). Данный источник был разработан в лаборатории проф. Акишева Ю.С. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»).

Струя холодной плазмы получалась в результате продува аргона сквозь разрядную зону между цилиндрическими электродами, расположенными внутри плазменного источника. В качестве газового разряда использовался разряд с частотой синусоидального напряжения 100 кГц и амплитудой 4 кВ. Электрическая мощность, потребляемая разрядом, - 1 Вт. Скорость плазменной струи на выходе из источника составляла 20 м/с. Как видно из рис. 1, плазменная струя, истекающая в свободное пространство, является достаточно тонкой (около 1 мм), но когда струя ударяет в обрабатываемое изделие, то она сильно растекается по его поверхности. Таким образом, тонкая струя плазмы обрабатывает поверхность по площади, намного превышающей ее собственное исходное сечение.

Время экспозиции при обработке составляло 5 сек.

Разработка методики низкотемпературного упрочнения оптического контакта с использованием плазменной активации проводилась путем измерения механической прочности ОК и оценкой потока натекания через соединения методом эмиссионного спектрального анализа [7].

Повышение механической прочности ОК после плазменной обработки проверялось с использованием разрывной машины Shimadzu EZ-LX. Для оценки потока натекания методом эмиссионного спектрального анализа использовался спектрограф Andor Shamrock SR-750.

Эксперименты по упрочнению ОК проводились как на образцах, изготовленных из одного материала, так и при соединении деталей из разных материалов.



**Рисунок 1.**

Внешний вид источника и плазменной струи, свободно истекающей в окружающий воздух и растекающейся по поверхности обрабатываемого изделия

**Таблица 1.**

Механическая прочность на разрыв для образцов из ситалла и клиакерама

Материал	Механическая прочность (среднее значение), Н	
	контрольный образец	с плазменной активацией
Ситалл СО-115М	300	610
Клиакерам (Clearceram-Z)	330	570

### Показатели качества

Результаты испытаний ОК ситалловых и клиакеромовых образцов на механическую прочность представлены в таблице 1. Результаты приведены для оптимального времени обработки образцов плазмой.

В таблице 1 представлены результаты механических испытаний для образцов, не подвергавшихся термообработке после плазменной обработки. Как видно из этого рисунка, обработка поверхностей контактирующих деталей ЛГ холодной плазмой аргона в атмосфере воздуха позволяет существенно увеличить прочность оптического контакта по сравнению с контрольными образцами, подвергавшимися только «мокрой» химической чистке.

Контрольные образцы ситалла и клиакерама отрывались друг от друга при силе, равной примерно 300 Н. При этом прочность оптического контакта увеличилась в 2 раза для изделий из ситалла и в 1.7 раза - для изделий из клиакерама.

Сравнения потока натекания через ОК было проведено с использованием собранных резонаторов ЛГ. Было установлено, что при сборке резонаторов из одного материала с использованием плазменной активации, поток микронатекания уменьшился в несколько раз по сравнению со стандартной технологией. Кроме того, использование плазменной активации позволило получить такие же уровни микронатеканий и в резонаторах, из смешанных материалов (Clearceram и ситалл). Качество ОК в данных резонаторах было проверено после вибрационных воздействий, а также после климатических испытаний в диапазоне температур  $-55^{\circ}\text{C}$  -  $+170^{\circ}\text{C}$ .

#### **Объем инвестиций**

Стоимость внедрения данной технологии на предприятии и изготовление двух рабочих мест не превышает пяти миллионов рублей.

#### **Заключение**

В результате выполненных работ показано, что использование разработанного аргонового плазменного источника на базе барьерного разряда позволяет существенно повысить прочность ОК при обработке оптических деталей ЛГ. Было установлено, что новая технология может быть использована для соединения образцов, изготовленных из разнородных материалов (Clearceram и ситалл).

Плазменная технология не требует больших затрат и большого пространства для ее развертывания в реальном производстве, поскольку источник плазмы является малогабаритным и мобильным. Данная технология обеспечивает высокую скорость обработки деталей ЛГ, малое энергопотребление, не требует использования химически агрессивных жидкостей и является экологически безопасной. Полученные результаты позволяют рекомендовать холодную плазму аргона при атмосферном давлении в качестве эффективного инструмента для новой технологии упрочнения оптического контакта деталей, используемых при сборке лазерных гироскопов.

#### **Список литературы:**

1. И.В.Обреимов, Е.С.Трехов, «ЖЭТФ», т.32, в.2, с.185, (1957).
2. Б.В.Дерягин, Н.Л.Кротова, В.П.Смилга, *Адгезия твердых тел*, (1977).
3. В.М. Золотарев и др. «ФТТ», т.20, №1, с.177, (1978).
4. G.Buyle, J.Schneider, M.Walker, Y.Akisev, A.Napartovich, M.Perucca, WILEY-VCH, Verlag, GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 400 p, pp. 33-62. (2010).
5. Y.Akisev, M.Grushin, N.Dyatko, I.Kochetov, A.Napartovich, N.Trushkin. WILEY-VCH, Verlag, GmbH&Co. KGaA, Weinheim, 400 p, pp. 295-332, (2010)/
6. Yu.S.Akisev, M.E.Grushin, A.I.Drachev, V.B.Karalnik, A.V.Petryakov, N.I.Trushkin, «*The Open Plasma Physics Journal*», vol. 6, (Suppl 1: M4) 19-29. (2013).
7. Е.С.Белов, В.Э.Бруггер, Л.Д.Маш, Э.П.Пролейко, Е.В.Сухов, *Научно-технологии*, №10, с.53, (2012).



## **ACTIVATION OF DIELECTRIC SURFACES BY COLD PLASMA FOR OPTICAL CONTACT HARDENING**

**Azarava V.V., Akishev Yu.S.\*, Golyaeva A. Yu., Grushin M.E., Krasnov V.I.,  
Petryakov A.V.\*, Sukhov E.V., Trushkin N.I.\***

JSC «POLYUS research institute of M.F.Stelmakh», Moscow, Russia

\* JSC «SRC RF TRINITI», Moscow, Russia

This paper presents a method for optical contact hardening of dielectric surfaces by plasma activation. The possibility to fabricate resonators of ring lasers including made of dissimilar materials by this method is shown.

## **ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ГИРОСКОПИИ**

**Азарова В.В., Цветкова Т.В., Чертович И.В., Фокин В.В.**

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия

Электронно-оптическое приборостроение

Представлены результаты исследований влияния качества оптических поверхностей и тонких пленочных слоев на характеристики многослойных интерференционных диэлектрических отражающих покрытий зеркал, а именно величин рассеяния, в частности рассеяния “назад” – в моду резонатора, поглощения, фазовой анизотропии резонаторных зеркал и их связь с характеристиками лазерного гироскопа.

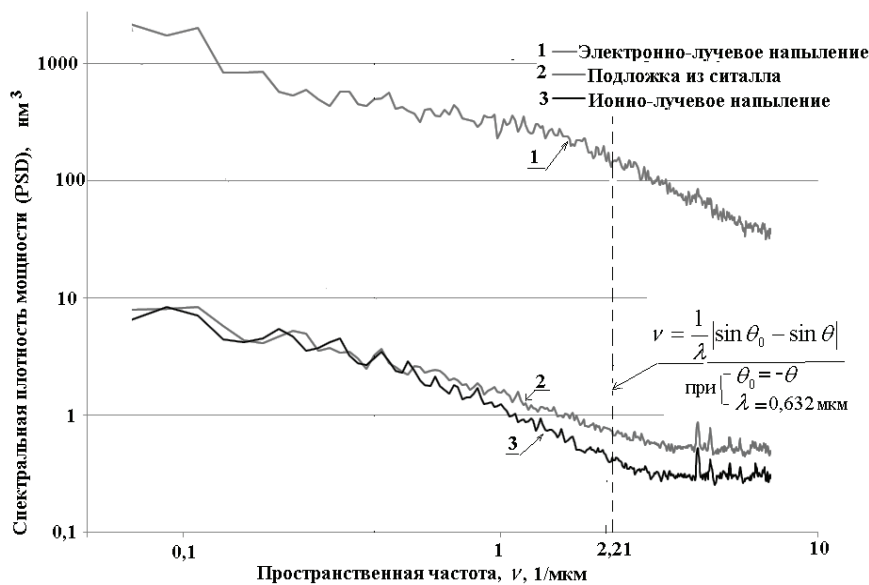
### **Введение**

Многочисленные применения кольцевых газовых лазеров в системах управления движением различных объектов [1-3] и повышение требований к точности этих систем приводит к необходимости более глубокого исследования оптических элементов, входящих в их состав.

### **Структурная схема**

В работе сформулированы требования к прецизионным оптическим поверхностям и лазерным зеркалам, применяемым в лазерной гироскопии. Обсуждаются характеристики и статистические параметры прецизионных оптических поверхностей. Сопоставляются результаты измерений, полученных разными метрологическими методами, а именно: методом атомно-силовой микроскопии (AFM), светового и рентгеновского рассеяний (TIS, ARS, XRS) и методом низко когерентной интерферометрии (WLI) с помощью функции спектральной плотности мощности (PSD-функции).





**Рисунок 1.**

PSD-функции поверхностей многослойных интерференционных диэлектрических отражающих покрытий зеркал, нанесенных разными методами: 1- методом электронно-лучевого напыления и 3-методом ионно-лучевого напыления. Кривой 2 показано спектральное распределение высот шероховатости поверхности подложки из ситалла, на которую нанесены покрытия.

$\theta_0$  и  $\theta$  - углы падения и отражения излучения от поверхностей

Функция спектральной плотности мощности дает полную статистическую информацию о распределении высот шероховатости по пространственным частотам.

В качестве примера на рис. 1. приведены спектральные распределения неровностей поверхностей в диапазоне пространственных частот (0,05-10) 1/мкм. подложки и зеркал, изготовленных разными методами.

Кривая 1 описывает PSD –функцию поверхности зеркала, многослойное покрытие которого ( $ZrO_2 / SiO_2$ ) нанесено методом электронно-лучевого напыления на подложку с PSD –функцией, описываемой кривой 2.

Кривая 3 описывает PSD –функцию поверхности зеркала, многослойное покрытие которого ( $Ta_2O_5 / SiO_2$ ) нанесено методом ионно-лучевого напыления на подложку с PSD –функцией, описываемой также кривой 2. Из сравнения кривых видно, что уровень высот неровностей зеркала, полученного методом электронно-лучевого напыления, на несколько порядков превосходит величину неровностей на всех пространственных частотах на зеркале, полученном путем ионно-лучевого напыления. При этом величина шероховатости поверхности циркониевого зеркала определяется размерами кластеров нанесенных покрытий, а поверхность танталового зеркала повторяет поверхность подложки в диапазоне пространственных частот ( $\nu < 1$ )  $\text{мкм}^{-1}$ . Пунктирная кривая определяет уровни неровностей на пространственной частоте, ответственной за рассеяние “назад”- в моду симметричного кольцевого резонатора. Приведенное значение пространственной частоты ( $\nu = 2,21$ )  $\text{мкм}^{-1}$  рассчитано для углов падения и отражения, равных 45 град.

### Показатели качества

Путем сравнения уровней неровностей подложки и нанесенного на ней покрытия можно сделать следующее заключение. В некотором диапазоне пространственных частот ( $\nu > 1$ )  $\text{мкм}^{-1}$  покрытие, нанесенное методом ионно-лучевого напыления, заглаживает не-

ровности подложки и, тем самым, приводит к уменьшению рассеяния в моду резонатора.

Общим критерием качества поверхности при этом является величина эффективной шероховатости  $\sigma_{\text{eff}}$  в заданном диапазоне пространственных частот.

Величина коэффициента отражения зеркал и потерь на интегральное рассеяние зависит от величины шероховатости  $\sigma_{\text{eff}}$  их подложек, но не только.

Анализируется связь между профилем поверхности многослойного покрытия и поверхности подложки зеркала. Показано, что величина интегрального рассеяния поверхности  $S(\lambda)$  пропорциональна квадрату величины ее шероховатости  $\sigma$ . Если поверхность представляет собой многослойное покрытие, то при полной корреляции между слоями межслойное изменение  $\sigma$  будет минимальным и наблюдаемая величина рассеяния света будет близкой к определяемой шероховатостью поверхности подложки. Не идеальность процесса нанесения слоев и условий окружающей среды при этом, недостаточная чистота материалов мишеней при нанесении слоев могут привести к неполной межслойной корреляции. При частичной корреляции между слоями  $S(\lambda)$  будет меняться с каждым дополнительным слоем, и рассеяние будет зависеть не только от качества поверхности подложки, но и от числа слоев. Это, в свою очередь, приведет к увеличению потерь на рассеяние многослойным интерференционным зеркалом.

Обсуждаются результаты анализа поверхностей и характеристик тонких однородных и градиентных пленок при использовании методов лазерной и спектральной эллипсометрии. Проведенное в работе исследование синтеза тонких пленок многослойных интерференционных покрытий лазерных зеркал и оптимизация режимов их изготовления позволило уменьшить потери резонаторов на поглощение в несколько раз.

#### **Объем инвестиций**

Стоимость разработки, изготовления и внедрения оборудования и технологий ионно-лучевого нанесения зеркальных покрытий и сопутствующего метрологического обеспечения, а также технологии получения необходимых сверхгладких поверхностей подложек зеркал превышает триста миллионов рублей.

#### **Заключение**

В результате проведенного анализа в работе были сделаны следующие выводы:

– метод некогерентной интерферометрии (WLI) является наиболее эффективным метрологическим методом для контроля шероховатости прецизионных оптических поверхностей подложек лазерных зеркал;

– функция спектральной плотности мощности (PSD-функция) дает полную статистическую информацию о распределении высот шероховатости по пространственным частотам;

– зеркала, изготовленные путем ионно-лучевого напыления на сверх-гладкие поверхности подложек имеют минимальные потери и минимальную величину рассеяния назад в моду резонатора.

#### **Список литературы:**

1. В. В. Азарова, Ю. Д. Голяев, И.И.Савельев. *Квантовая Электроника*, 45 №2, с.171-179, (2015).
2. С.Ю.Алексеев, А.В.Молчанов, М.В.Чиркин и др. *Гироскопия и навигация*, №2, с.75-83, (2013).
3. М.А.Абдулкадыров, С.П.Белоусов, В.Е. Патрикеев и др. *Технологии обработки оптических элементов...* Тезисы доклада. с.10-12, г. Минск, (2013).

## **PROBLEMS OF CREATION OF PRECISION MIRRORS FOR LASER GYROS**

**AV. Azarova, T. Tsvetkova, I. Chertovich, V. Fokin**  
R&DI “Polyus” named by M.F.Stelmakh, Moscow, Russia

Presents the results of research of influence of quality of optical surfaces and thin film layers on the dielectric characteristics of the multilayer interference reflecting coating of the mirrors, namely the values of scattering, in particular scattering back into the resonator mode, absorption and phase anisotropy of the cavity mirrors and their relationship to characteristics of the laser gyro.

## **ФОТОННЫЕ КРИСТАЛЛЫ В РАЗРАБОТКЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ**

**Сорокин Ю.В.**

АО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика»,  
г. Москва, Россия

Современные оптико-электронные приборы и комплексы создаются на основе новой технологической элементной базы. Одним из результативных направлений развития элементной базы стали фотонные кристаллы. Аналогично обычным кристаллам, фотонные кристаллы содержат высокосимметричную структуру элементарных ячеек, причем, если структура обычного кристалла определена положениями атомов в решетке, структура фотонного кристалла состоит из периодической пространственной модуляции диэлектрической постоянной среды, масштаб которой сопоставим с длиной волны взаимодействующего излучения. Периодичность модуляции диэлектрической постоянной можно создавать в одной, двух, или трех пространственных координатах, формируя одно-, двух- и трехмерные фотонные кристаллы. Комбинации этих структур создают среду для обработки и трансформации оптического сигнала.

Первое применение фотонного кристалла – создание световедущих каналов. Второе применение – это спектральное разделение каналов. Третье – кросс для световых потоков.

### **Оптические устройства на фотонных кристаллах**

#### **1. Логические элементы.**

В области квантовой логики имеется два классических логических элемента - XOR(исключающее или) и SWAP (обратимый вентиль), относящихся к классу двухбитной логики, поскольку процесс обработки информации в них идентичен двум хорошо известным явлениям квантовой оптики – инверсии спина и эффекту телепортации состояний. Квантовые двухуровневые информационные ячейки – кубиты. Квантовые логические элементы (ЛЭ) и логические операции (ЛО). Одно-кубитовые ЛЭ: фазовращатель, тождественное преобразование, «НЕ» и др. Оптическая реализация ЛО Адамара - светоделитель. Последовательности одно-кубитовых ЛЭ – интерферометры.

С физической точки зрения, квантовые XOR и SWAPP-переключатели можно представить либо как некоторые оптические кристаллы, в которых происходит смешивание двух однофотонных импульсов (это  $ab$  и  $cd$ ) с попарно ортогональными поляризациями, либо как четырехволновую систему оптически-связанных волокон (волокна  $a, b, c, d$ ), причем наличие фотона в волокне кодируется единицей в соответствующем векторе состояния суперпозиции, а вакуумное состояние – нулем.

## 2. Оптические элементы.

- Оптические линии задержки (ЛЗ) - базовые элементы полностью оптических компьютеров будущего. Существенное замедление света в ФК служит физической основой ЛЗ.
- Волоконно-оптический мультиплексор-демультиплексор с фотонными кристаллами.
- Оптический сумматор с фотонными кристаллами.
- Оптический фильтр с фотонными кристаллами.
- Источник суперконтинуума.

## Выводы

Рассмотрены принципы построения устройств на основе фотонно-кристаллических структур. Логические устройства на основе квантовой логики позволяют создать оптические процессорные устройства. Квантовая логика позволяет оптимизировать построение оптических устройств.

Рассмотрен анализ построения фотонно-кристаллических структур. Генерация суперконтинуума позволяет построить различные источники излучения для телекоммуникационных направлений. Учет запрещенных и разрешенных зон фотонных кристаллов позволяет создавать различные комбинации двухмерных и трехмерных структур и на их основе проанализированы фильтры, сумматоры, мультиплексоры и генераторы.

## **ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ КАРБИДА КРЕМНИЯ ПУЧКАМИ КЛАСТЕРНЫХ ИОНОВ И НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ МЕТОДОМ ФЛИКЕР-ШУМОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

**Гусев А.С., Иешкин А.Е.\*, Каргин Н.И., Матющенко И.А.,  
Павлова Е.П., Рындя С.М., Тимашов С.Ф.**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

г. Москва, Россия

\* МГУ, г. Москва, Россия

Микро- и наноэлектроника

Исследовано влияние ионно-кластерной обработки на морфологию поверхности пластин 6H-SiC. Установлено, что обработка поверхности карбида кремния кластерами аргона с энергией 30 кэВ и дозой  $1 \times 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к уменьшению параметра ступенчатости поверхности в 1,5 – 2 раза.

Одним из прорывных направлений развития технологии микро- и нанoeлектроники на сегодняшний день является применение кластерных ионных и атомных пучков, в том числе для планаризации поверхности диэлектрических и полупроводниковых сверхтвердых материалов (CVD-алмаз, карбид кремния, сапфир, кварцевое стекло) до уровня шероховатости 0,1 нм, недостижимого другими методами. В работе исследовалось влияние ионно-кластерного облучения на топологию поверхности пластин из кристаллов 6H-SiC, выращенных методом Лели. Образцы имеют кристаллографическую ориентацию <0001> и легированы азотом до концентрации  $(1,8 \div 7) \times 10^{17}$ . Ионно-кластерная обработка осуществлялась с помощью установки *Exogenesis nAccel 100*. Кластеры аргона, полученные при адиабатическом расширении газа через сверхзвуковое сопло, ионизировались и ускорялись напряжением 30 кэВ. Давление в рабочей камере составляло  $3 \times 10^4$  Torr.

Рельеф поверхности пластин 6H-SiC до и после воздействия пучка кластерных ионов изучался с помощью сканирующего зондового микроскопа *Solver Next* (НТ МДТ). Измерения проводились в полуконтактном режиме, с использованием кантилеверов NSG01, размер анализируемой области составлял  $10 \times 10$  мкм, разрешение  $512 \times 512$  точек.

Определялись параметры шероховатости поверхности образцов по данным АСМ изображений методом фликер-шумовой спектроскопии (ФШС). Количественный анализ топологии каждого образца проводился для трех различных участков его поверхности. Затем значения параметров шероховатости усреднялись. Известно [1], что шероховатость поверхности описывалась двумя основными параметрами:

- параметр  $\sigma$ , нм, являющийся мерой нерегулярностей-скачков исследуемого профиля и характеризующий среднеквадратичное отклонение высот профиля от базового профиля, формируемого совокупностью низкочастотных резонансных составляющих хаотических зависимостей  $h(x)$ ; этот параметр определяется как фактор «ступенчатости» хаотической составляющей высот профиля;

- параметр  $Sc(L_0^{-1})$ ,  $(\text{нм})^2 \cdot \text{мкм}$ , являющийся мерой «высокочастотных» нерегулярностей исследуемого профиля, наиболее резко изменяющихся на масштабах 1-100 нм особенностей рельефа; этот параметр определяется как фактор «острийности» структуры поверхности.

Усредненные ФШС параметры по трем АСМ-сканам приведены в табл. 1.

**Таблица 1.**

№ образца	До обработки		После обработки 75 мин	
	$\sigma$ , нм	$Sc(L_0^{-1})$ , $(\text{нм})^2 \cdot \text{мкм}$	$\sigma$ , нм	$Sc(L_0^{-1})$ , $(\text{нм})^2 \cdot \text{мкм}$
1, Si-грань	2,11	0,02	0,88	0,03
2, Si-грань	2,35	0,04	1,42	0,06
1, C-грань	1,80	0,02	1,12	0,03
2, C-грань	1,83	0,02	1,17	0,06

Наблюдается значительное уменьшение параметра  $\sigma$  «ступенчатости» в 1,5 – 2 раза после обработки пучками кластерных ионов, что говорит о существенном сглаживании поверхности. Параметр  $Sc(L_0^{-1})$  практически не изменяется, т.е. обработка поверхности не увеличивает «острийность» структуры поверхности. Однако полностью от т.н. «алмазного фона» избавиться не удалось, что указывает на необходимость увеличения дозы облучения или энергии кластерных ионов, взаимодействующих с поверхностью SiC.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEF157814X0064).

#### Список литературы:

1. С.Ф. Тимашев, С.Г. Лакеев, П.И. Мисуркин и др. // *Параметризация структуры хаотических поверхностей в нанометровом диапазоне по данным атомно-силовой микроскопии* / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. №3, 2013, Т.79.

### **ПРОЗРАЧНЫЕ СТЕКЛОКЕРАМИКИ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ ZnO И Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, АКТИВИРОВАННЫМИ ИОНАМИ КОБАЛЬТА, ДЛЯ ПАССИВНОЙ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ЭРБИЕВЫХ ЛАЗЕРОВ БЕЗОПАСНОЙ ДЛЯ ЗРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ**

**Алексеева И., Дымшиц О., Жилин А., Шемчук Д., Запалова С.,  
Центер М., Лойко П., Скопцов Н., Маляревич А., Юмашев К.\*,  
Богданов К., Виткин В.\*\***

НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия

\*Центр оптических материалов и технологий, Белорусский национальный  
технический университет, г. Минск, Беларусь

\*\*Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия

Прикладная спектроскопия

Исследованы структура и оптические свойства новых прозрачных стеклокерамик калиевоцинковоалюмосиликатной системы, содержащих нанокристаллы  $\text{Co}^{2+}:\text{ZnO}$  и  $\text{Co}^{2+}:\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ . Обнаружено, что при термообработке стекол ионы  $\text{Co}^{2+}$  из исходного стекла сначала входят в образующиеся нанокристаллы  $\text{ZnO}$ , а при повышении температуры и в нанокристаллы  $\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ . Получена пассивная модуляция добротности эрбиевых лазеров с использованием пассивных затворов на основе стеклокерамик с нанокристаллами  $\text{Co}^{2+}:\text{ZnO}$  и со смесью нанокристаллов  $\text{Co}^{2+}:\text{ZnO}$  и  $\text{Co}^{2+}:\beta\text{-Zn}_2\text{SiO}_4$ . Сдвиг полосы поглощения тетраэдрически координированных ионов кобальта в ИК область по сравнению с положением этой полосы в кристаллах алюмомагниево-шпинели, активированной ионами кобальта, позволяет использовать эти материалы в качестве пассивных затворов не только для Ег лазеров на стекле, а также для кристаллических Ег лазеров [1,2].

#### Введение

Без пассивных модуляторов добротности ИК лазеров невозможно создание новых лазеров работающих в безопасной для глаза спектральной области, которые используются в лазерной хирургии, дальнометрии, для зондирования атмосферы и в других сферах



деятельности, в которых возможен контакт с лазерным излучением. Для производства пассивных модуляторов добротности твердотельных эрбиевых лазеров с длиной волны генерации в спектральном диапазоне 1.5-1.8 мкм требуются материалы, обладающие эффективным насыщающимся поглощением в ближней ИК области спектра. Они должны также обладать высокой контрастностью и другими оптимальными спектрально-оптическими и термо-механическими свойствами. Прозрачные стеклокристаллические материалы с нанокристаллами, содержащими ионы  $\text{Co}^{2+}$  в тетраэдрической координации, являются перспективными насыщающимися поглотителями для создания таких пассивных затворов.

### Экспериментальная часть

Стекла массой 200 г. состава (мол. %) 12  $\text{K}_2\text{O}$ , 28  $\text{ZnO}$ , 12  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 48  $\text{SiO}_2$  без каких-либо легирующих примесей и легированные 0,01 - 3,0 мас. %  $\text{CoO}$  были получены синтезом в платиновых тиглях при  $1580^\circ\text{C}$  в течение 5 ч с принудительным перемешиванием. Для создания стеклокристаллических материалов они были термообработаны в интервале температур от  $680$  до  $1000^\circ\text{C}$  в течение 2 - 100 ч. Структура исходных стекол и ее превращения при термообработке исследованы методами рассеяния рентгеновских лучей под малыми углами (РМУ), рентгенофазового анализа (РФА), дифференциального термического анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС), поглощения и люминесцентной спектроскопии. Были оценены нелинейные свойства прозрачных стеклокерамик, легированных  $\text{CoO}$ .

### Результаты и обсуждение

Согласно данным РМУ и РФА, исходные рентгеноаморфные стекла микронеоднородны. Области неоднородности образуются в них во время охлаждения стекла и его отжига. Введение  $\text{CoO}$  влияет на ликвационные процессы, которые предшествуют стадии кристаллизации и изменяют природу кристаллических фаз и кинетику их кристаллизации. Согласно данным РФА, в зависимости от режимов термообработки и концентрации  $\text{CoO}$  стеклокерамика содержит либо нанокристаллы  $\text{ZnO}$ , либо смесь наноразмерных кристаллов  $\beta$ -виллемита,  $\beta$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ , и оксида цинка, либо только наноразмерные кристаллы  $\beta$ -виллемита. Термообработка температурах  $950 - 1000^\circ\text{C}$  приводит к кристаллизации  $\alpha$ -виллемита,  $\alpha$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  и потере материалом прозрачности. Данные спектроскопии КРС подтверждают эти результаты.

Из анализа спектров поглощения видно, что ионы  $\text{Co}^{2+}$  входят в структуру наноразмерных кристаллов оксида цинка,  $\text{ZnO}$ , и  $\beta$ -виллемита. Они занимают тетраэдрические позиции ионов  $\text{Zn}^{2+}$  в кристаллах  $\text{ZnO}$ . Увеличение интенсивности поглощения тетракоординированных ионов кобальта коррелирует с увеличением доли кристаллизующегося  $\text{ZnO}$ . При выделении кристаллов  $\beta$ - $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$  ионы  $\text{Co}^{2+}$  входят в их состав в искаженной тетраэдрической и октаэдрической координациях в позиции ионов  $\text{Zn}^{2+}$ .

С использованием прозрачных стеклокерамик на основе наноразмерных кристаллов  $\text{Co}:\text{ZnO}$  и смеси наноразмерных кристаллов  $\text{Co}:\text{ZnO}$  и  $\text{Co}:\beta$ -виллемита была получена пассивная модуляция добротности  $\text{Er}$ ,  $\text{Yb}$ : лазера на стекле с использованием боковой диодной накачки. Смещение спектральной полосы в ИК область по сравнению с обычными насыщающимися поглотителями (алюмомагниевого шпинелью, активированной ионами кобальта) позволяет использовать эти материалы в качестве насыщающихся поглотителей не только для  $\text{Er}$  лазеров на стекле, но также и для кристаллических  $\text{Er}$  лазеров [1,2].

## Выводы

Разработаны новые прозрачные стеклокерамики с нанокристаллами ZnO и  $Zn_2SiO_4$ , активированными ионами кобальта, для пассивной модуляции добротности эрбиевых лазеров безопасной для зрения спектральной области. Исследованы их структура и свойства. Разработанные материалы перспективны насыщающиеся поглотители для широкого круга эрбиевых лазеров.

### Список литературы:

1. P.A. Loiko, O.S. Dymshits, V.V. Vitkin, N.A. Skoptsov, A.A. Zhilin, D.V. Shemchuk, M.Ya. Tsenter, K.V. Bogdanov, A.M. Malyarevich, I.V. Glazunov, X. Mateos, K.V. Yumashev, *Laser Phys.* 13, p. 055803 (7pp) (2016).

2. P.A. Loiko, O.S. Dymshits, V.V. Vitkin, N.A. Skoptsov, A.A. Zhilin, D.V. Shemchuk, M.Ya. Tsenter, K.V. Bogdanov, A.M. Malyarevich, I.V. Glazunov, X. Mateos, K.V. Yumashev, *Appl. Optics* 55, №21, 5505-5512 (2016).

## TRANSPARENT GLASS-CERAMIC SATURABLE ABSORBERS BASED ON ZnO AND $Zn_2SiO_4$ NANOCRYSTALS FOR PASSIVE Q-SWITCHING OF EYE-SAFE Er LASERS

**I. Alekseeva, O. Dymshits, A. Zhilin, D. Shemchuk, S. Zapalova, M. Tsenter, P. Loiko\*, N. Skoptsov\*, A. Malyarevich\*, K. Yumashev\*, K. Bogdanov\*\*, V. Vitkin\*\***

NITIOM Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, Russia

\*Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

\*\*National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

Structure and optical properties of novel transparent glass-ceramics of the potassium zinc aluminosilicate system containing  $Co^{2+}:ZnO$  and  $Co^{2+}:\beta-Zn_2SiO_4$  nanosized crystals were studied. In the course of heat-treatment, cobalt ions from the initial glass first enter the ZnO nanosized crystals and then, at elevated temperatures, the  $\beta-Zn_2SiO_4$  crystals as well. Passive Q-switching is obtained using saturable absorbers made of glass-ceramics based on  $Co^{2+}:ZnO$  and made of glass-ceramics based on a mixture of  $Co^{2+}:ZnO$  and  $Co^{2+}:\beta-Zn_2SiO_4$ . The red-shift of the absorption band related to the  $4A_2(4F) \rightarrow 4T_1(4F)$  transition of  $Co^{2+}$  ions in glass-ceramics as compared with its position in conventional  $Co:MgAl_2O_4$  single crystal suggests the usage of these glass-ceramics as saturable absorbers not only for Er,Yb:glass lasers but for Er:crystal lasers as well.

# ФОТОМОДУЛЬ 320X256 НА ОСНОВЕ InGaAs/InP ДЛЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Кузнецов П.А., Моцев И.С.\*

АО «НПО «Орион», г. Москва, Россия

\*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия

Инновационные проекты. Продукция двойного назначения: технологии, продукты, решения, услуги

В АО «НПО «Орион» создано матричное фотоприемное устройство с расширенным функционалом. Помимо получения тепловизионного изображения оно позволяет вести работу в дальномерном режиме, а так же в режиме приема асинхронных импульсов. Разработанный ФМ не имеет аналогов в России и имеет хорошие перспективы применения с матрицами лавинных фотодиодов.

Разработанный фотомодуль (ФМ) имеет формат матрицы входных ячеек – 320x256 с шагом 30мкм. ФМ предназначен для применения в составе активных формирователей 3D изображения по отраженным лазерным импульсам малой длительности (десятки наносекунд) и длиной волны 1.54 мкм или 1.06 мкм. В качестве датчиков сигнала обычно используются матрицы р-і-п фотодиодов или фотодиодов с лавинным умножением на основе InGaAs/InP. Основной особенностью ФМ является введение во все входные ячейки функции измерения дальности до произвольной точки исследуемого объекта. При этом сохраняется функция формирования обычного 2D изображения по сигналам яркости. Основу ФМ составляет кремниевая БИС считывания. В БИС считывания имеется оконный режим просмотра изображения и переключение количества информационных выходов (8 или 1). Потребляемый ток - 50мА при напряжении питания - 3.3В. Пороговый сигнал в дальномерном режиме порядка 250 электронов при длительности импульса - 50нс (на обычной ріп матрице без умножения).

Ближайшим аналогом является ФПУ фирмы SCD формата 640x512 (шаг 15 мкм) для ближнего ИК-диапазона с двумя дополнительными функциями: измерение дальности и асинхронный режим для обнаружения посторонних источников лазерного излучения.

На основе разработанного ФМ была проведена визуализация изображений в ближнем ИК спектре (0.9-1.7 мкм) в различных режимах работы БИС считывания при комнатной температуре ФМ и без компьютерной обработки дефектов.

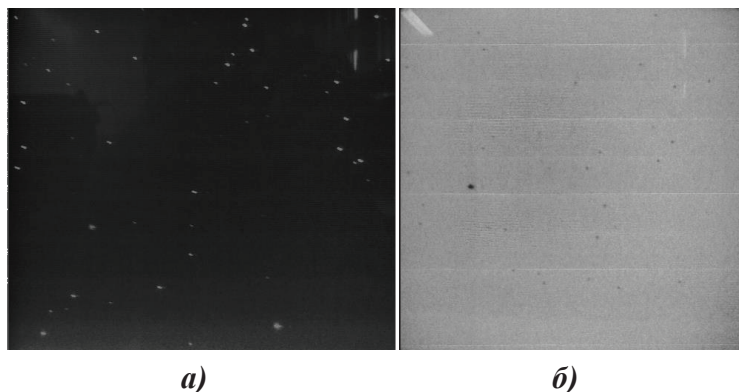


Рисунок 1.

Обычное изображение: горячий паяльник и пятно от лазерных импульсов  $\lambda=1.54$  мкм с выхода оптоволокна,  $t_i=50$ нс

На рис. 1 показано в обычном 2D режиме яркостное изображение горячего паяльника и пятна от лазерных импульсов на выходе оптоволокну с  $\lambda=1.54$  мкм,  $t_i=50$ нс. В этом режиме невозможно различить источники импульсного и непрерывного излучения, т.к. обработка фотосигнала происходит только в секции накопления входной ячейки.

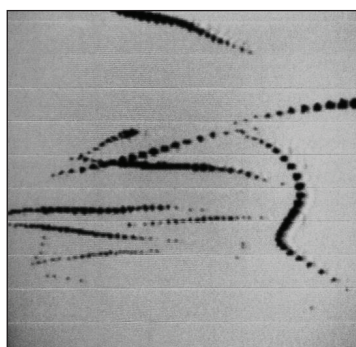
В дальномерном и асинхронном режимах осуществляется частотная фильтрация только коротких лазерных импульсов и устранение сигналов низкочастотного фона. На рис. 2 приведены два изображения пятна от лазерного импульса: в обычном режиме пятно маскируется точечными дефектами (рис. 2а); в дальномерном режиме пятно четко выделяется среди точечных помех, уровень которых сводится к нулю при повышении порога компараторно-триггерной схемы ячейки (рис. 2б). Яркость пятна линейно зависит от дальности источника излучения (прямого или отраженного).



**Рисунок 2.**

- а) маскировка лазерного пятна точечными дефектами в обычном изображении;
- б) выделение лазерного пятна в дальномерном режиме

Существует третий, асинхронный, режим работы ФМ с представлением сигнала в бинарном виде, т.е. с двумя яркостными градациями. Здесь важен только факт наличия или отсутствия сигнала асинхронного лазерного излучения от посторонних источников (дальномеров, систем высокоточного наведения и т.д.). Кроме того, есть функция запоминания траектории движения лазерного пятна по многим кадрам (рис. 3). Разработанный ФМ не имеет аналогов в России и имеет хорошие перспективы применения с матрицами лавинных фотодиодов.



**Рисунок 3.**

- Бинарный (асинхронный) режим: запоминание произвольных траекторий лазерного пятна с  $\lambda=1.54$  мкм,  $t_i=50$ нс, излучаемого с выхода оптоволокну

## КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЕНСОРИКА

**Никонов А.В., Бурлаков И.Д.\*, Болтарь К.О.**

АО «НПО «Орион», г. Москва, Россия

МФТИ (ГУ), г. Москва, Россия

\*Московский технологический университет, г. Москва, Россия

Инновационные проекты. Продукция двойного назначения: технологии,  
продукты, решения, услуги

Для решения задач космической фотоэлектроники ключевое значение имеет совершенствование технологий создания матричных и многорядных фотоприемных устройств на основе различных полупроводниковых гетеро- и квантоворазмерных структур. Выполняемые АО «НПО «Орион» разработки фотоприемных устройств нового поколения способствуют модернизации аппаратуры космического базирования.

Современный этап развития твердотельной фотоэлектроники для задач визуализации ИК-изображений и ИК-теплопеленгации однозначно связывается с технологиями создания матричных и многорядных фотоприемных устройств на основе различных полупроводниковых гетеро- и квантоворазмерных структур. Особое значение имеет развитие многодиапазонных приборов с чувствительностью одновременно в нескольких спектральных областях.

Космическая фотоэлектроника решает задачи создания фотоэлектронных изделий для космической оптико-электронной аппаратуры, предназначенной для мониторинга поверхности суши и океана, обнаружения летательных аппаратов и объектов на фоне Земли, контроля космического пространства, обнаружение космических объектов с Земли и из космоса и ряда других задач. На космические платформы возлагается ряд задач как народнохозяйственных, так и решающих вопросы обороны и безопасности страны. Важнейшим фактором развития космической фотоэлектроники является создание и улучшение элементной базы – фотоприемных устройств нового поколения. Выполняемые АО «НПО «Орион» разработки позволяют существенно изменить ситуацию во всей космической фотоэлектронике: целый ряд космических платформ оснащены оптико-электронной аппаратурой на основе самых современных инфракрасных устройств нового поколения (группировка КА серии «Электро», КА «Арктика-М», «Канопус-В-ИК», «Метеор-МП», ЕКС и др). Создана благоприятная ситуация для модернизации целой группы важнейшей аппаратуры космического базирования.

С целью модернизации фотоприемных устройств, предназначенных для решения задач систем раннего предупреждения о ракетном нападении, в объединении успешно разработаны и изготовлены образцы ФПУ, состоящие из фотомодулей формата 1024×10 элементов на основе фотодиодов из относительно широкозонного материала кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с рабочей температурой около 170 К.



Одним из примеров инновационных разработок в направлении создания многоспектральных многорядных фотоприемных устройств для дистанционного зондирования земной атмосферы с космических аппаратов является многоспектральная аппаратура мониторинга поверхности Земли и атмосферы. Основной задачей этой аппаратуры является гидрометеорология, вместе с тем она позволяет решать и ряд других народнохозяйственных задач, например, разведку полезных ископаемых, мониторинг сельскохозяйственных площадей, обнаружение природных катастроф и другие задачи. В 2012 году запущен первый КА такой системы – «Электро-Л». Для работы в составе аппаратуры метеорологического космического мониторинга разработан комплект из семи отдельных ФПУ в унифицированной конструкции для работы с фотодиодами из КРТ различных форматов (2×96 и 4×288 элементов). Приемники работают в областях спектра от 3,5 до 12,5 мкм в режиме ВЗН с накоплением по нескольким элементам и обеспечивают высокое качество получаемой информации.

В настоящее время АО «НПО «Орион» выполняет в интересах Роскосмоса ряд других разработок для перспективной аппаратуры космического базирования, в том числе ФПУ на средний и коротковолновый ИК-диапазоны спектра для бортового ИК Фурье спектрометра ИКФС-3 космического аппарата «Метеор-М», а также для широкозахватного многоканального отображающего ИК-радиометра системы дистанционного зондирования Земли на основе ФПУ с шестью многоспектральными «линейками» формата 4×576 элементов, работающими в режиме ВЗН в спектральных диапазонах от 3 до 12,5 мкм.

В целом реализация рассмотренных проектов позволила существенно изменить ситуацию во всей космической фотоэлектронике, создав благоприятную ситуацию для модернизации аппаратуры космического базирования.

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА АО ЛЗОС**

**Азербает А.А., Мухаммедзянов Т.Р., Семенов А.П., Абдулкадыров М.А.**

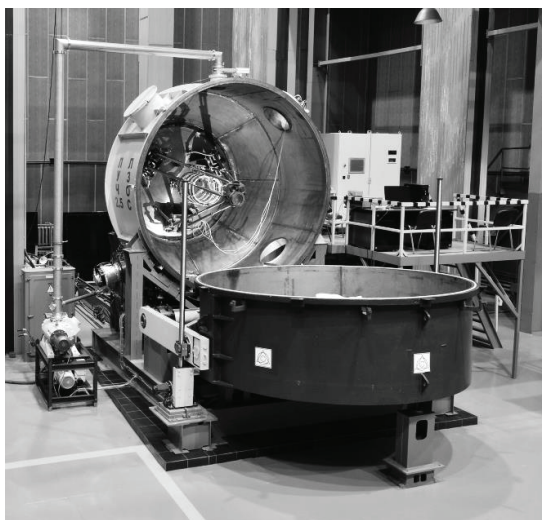
АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
Московская обл., г. Лыткарино, Россия  
Инновационные проекты. Продукция двойного назначения:  
технологии, продукты, решения, услуги

Рассмотрена реализация и применение вакуумных технологий – ионно-лучевой полировки и магнетронного нанесения покрытий, на крупнейшем в России предприятии по выпуску крупногабаритной оптики – АО «Лыткаринский завод оптического стекла».



В настоящее время оптика зеркальных и зеркально-линзовых систем усложняется в нескольких направлениях – увеличивается апертура оптических элементов, растет их асферичность, все чаще используются внеосевые оптические элементы, включая сегменты составных зеркал. Изготовление таких крупногабаритных зеркал, являющихся основным оптическим элементом объективов, требует совершенствования технологий изготовления крупногабаритной оптики. Это особенно важно для составных зеркал и высокоасферичных внеосевых элементов, изготовление которых традиционными методами затруднительно. Для решения данной задачи на АО ЛЗЭС были реализованы следующие вакуумные технологии: ионно-лучевая полировка, позволяющая получать оптические детали диаметром до 2,5 м с произвольной формой внешнего периметра и качеством рабочей поверхности по среднеквадратичному отклонению (СКО) до  $\lambda/60$  и магнетронное нанесение на оптические детали диаметром до 4 м отражающих покрытий с защитным слоем со сроком эксплуатации до 30 лет.

Для ионно-лучевой полировки была создана и апробирована вакуумная установка, представленная на рис. 1.



**Рисунок 1.**

Вакуумная установка для ионно-лучевой полировки

Технические характеристики вакуумной установки для ионно-лучевой полировки крупногабаритных оптических деталей:

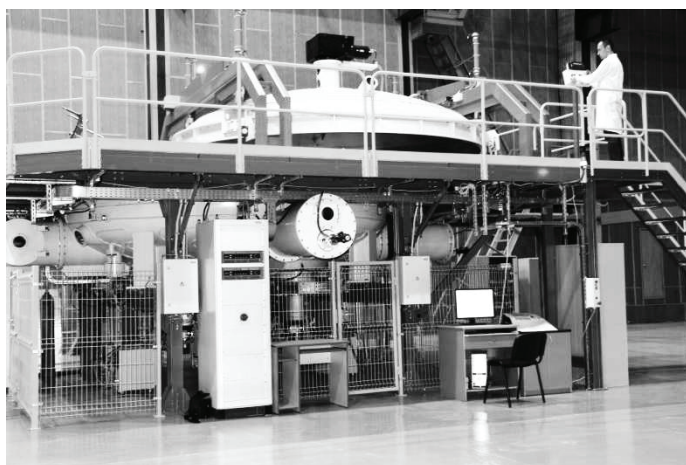
- диаметр обрабатываемой детали - до 2,5 м
- вес обрабатываемой детали - до 5,5 т
- форма обрабатываемой поверхности - плоская, выпуклая или вогнутая, сферическая или асферическая
- конфигурация внешнего периметра детали - произвольная
- достигаемая точность формы поверхности по СКО - до  $\lambda/60$
- система перемещения ионного источника - 6-ти координатный гексапод
- точность перемещений системы перемещения - линейная  $\pm 0,5$  мм, угловая  $\pm 1'$
- ионный источник - 2 источника с анодным слоем с диаметрами пучка ионов 50 и 100 мм
- ионный ток - до 140 мА

- энергия ионов в пучке - до 1,8 кэВ
- рабочий газ - аргон, ксенон
- откачная система - форвакуумные агрегаты на основе насосов Рутса и высоковакуумные турбомолекулярные насосы.

В рамках отработки технологии производилась доводка поверхности зеркала из астроситалла диаметром 1000 мм, толщиной 62 мм, с радиусом сферы 4000 мм. После нескольких сеансов обработки при помощи ионного пучка поверхность детали улучшилась по RMS: с ошибки  $RMS(W)=0.1371$  до ошибки  $RMS(W)=0.0191$  и по размаху ошибки: с  $P-V = 1.1371$  до  $P-V = 0.1211$ . Также получены следующие данные: профиль съема ионных источников повторяет профиль ионного пучка, т.е. подобен Гауссовому, скорость съема составляет до 90 нм/мин.

Представленная вакуумная установка не имеет аналогов в России. В мире всего две компании – Eastman Kodak (США) и Sagem (Франция), обладают подобной технологией и аналогичным по техническим характеристикам оборудованием.

Для магнетронного нанесения покрытия была создана и внедрена в производство вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий с защитным слоем на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4 м (рис. 2).



**Рисунок 2.**

Вакуумная установка для нанесения отражающего покрытия с защитным слоем.

Технические характеристики вакуумной установки для нанесения отражающего покрытия с защитным слоем:

- диаметр детали – до 4 метров
- максимальная масса детали – до 7 тонн
- метод нанесения покрытия – магнетронное распыление
- материалы покрытия - Al, Ag,  $SiO_2$ , SiO, SiNx, NiCrNx, и др.
- равномерность толщины покрытия –  $\pm 5\%$
- контроль процесса напыления – при помощи кварцевых датчиков
- время откачки до  $3 \cdot 10^{-6}$  мбар – 2 ч
- высоковакуумная и форвакуумная откачка – безмасляная

Достигнутые результаты для покрытия на основе Al (отражающий слой, 120 нм) с  $SiO_2$  (защитный слой, 180 нм) представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Требования и полученные результаты для покрытия Al+ SiO<sub>2</sub>

Параметр	Требование	Результат	Метод измерения
Рср. для 250-1200 нм	≥85%	86%	Спектрофотометр Lambda 950 с приставкой URA
Равномерность	≤ ±5%	соответствует	Равномерность Al покрытия измерялась на приборе NanoCam (динамический оптический профилометр). Равномерность защитного слоя SiO <sub>2</sub> – на основе коэффициента отражения.
Адгезия	без отрыва слоев покрытия	соответствует	Адгезия покрытия проверялась методом приклеивания специальных полосок с последующим резким отрывом.
Механическая прочность	I группа (2000 оборотов)	0 группа (3000 оборотов)	Механическая прочность проверялась на истирание на приборе типа CM-55.
Срок эксплуатации	10 лет	30 лет	Срок эксплуатации определен с помощью климатических испытаний для УХЛЗ.

Отражающее покрытие Al+ SiO<sub>2</sub> было нанесено на два зеркала Ø1150 мм: плоское зеркало и сферическое зеркало с радиусом сферы 34000 мм, на асферическое зеркало Ø1120 мм и на два зеркала Ø1050 мм. На всех зеркалах параметры покрытия соответствовали значениям, указанным в таблице 1. В ближайшем будущем планируется нанесение отражающего покрытия на ряд зеркал с диаметрами от 1,9 м до 4 м.

В настоящее время благодаря реализации технологий ионно-лучевой полировки и магнетронного нанесения покрытия АО ЛЗОС является единственным предприятием в России, обладающим полным – от варки стекла до нанесения покрытия - производственным циклом изготовления крупногабаритных оптических деталей диаметром до 4 метров.

**INNOVATIVE VACUUM TECHNOLOGIES IN THE MANUFACTURING OF LARGE OPTICAL COMPONENTS TO JSC LZOS**  
**Azerbaev A.A., Mukhammedzyanov T.R., Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A.**  
**JSC «Lytkarino Optical Glass Factory»**

Considered the implementation and application of vacuum technologies - ion-beam polishing and magnetron coating, on JSC «Lytkarino Optical Glass Factory» - the greatest manufacture of the large-size optics in Russia.

# **РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Галявов И.Р., Домнин А.В., Понин О.В., Симонов П.В., Шаров А.А.**

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
Московская обл., г. Лыткарино, Россия  
Крупногабаритные зеркально-линзовые телескопы

Описана актуальность и обоснованность применения композитных материалов в конструкции крупногабаритных зеркально-линзовых телескопов.

Появление новых технологий дает возможность использовать композитные материалы в конструкциях крупногабаритных телескопов. Это позволяет улучшить некоторые важные характеристики оптических систем, влияющих на качество изображения.

Новые композитные материалы с успехом применяются в конструкциях оптических систем различными производителями по всему миру и постоянно обновляются и дополняются.

Для систем наземного базирования основными характеристиками несущих частей корпуса являются масса, жесткость и температурный коэффициент линейного расширения. Наиболее приемлемым вариантом по совокупности этих характеристик, а также стоимости изготовления в России, является углепластик.

Использование современных технологий позволяет получить высокомодульные, легкие и недорогие углепластиковые детали.

Различные варианты компоновок металлических и углепластиковых частей в корпусе телескопа позволяют получить конструкцию с оптимальными выходными характеристиками, которые отвечают современным стандартам в оптическом приборостроении.

## **THE DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION STRUCTURES OF LARGE OPTIC SYSTEMS BASED ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING COMPONENTS USING COMPOSITE MATERIALS**

**I.R. Galyavov, A.V. Domnin, O.V. Ponin, P.V. Simonov, A.A. Sharov**  
SC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Russia  
A large catadioptric telescopes

Description of the actuality and validity of the application composite materials in the design of large catadioptric telescopes.

# РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ

Понин О.В., Галявов И.Р., Шаров А.А., Домнин А.В., Симонов П.В.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
Московская обл., г. Лыткарино, Россия  
Оптическое приборостроение

Описана инновационная система контроля взаимного положения оптических элементов крупногабаритных оптических систем как часть активной системы обеспечения стабильности этого взаимного положения.

В крупногабаритных оптических системах (диаметром свыше 1 метра), используемых в современных комплексах слежения наземного базирования, становится критичной проблема обеспечения взаимного расположения оптических элементов системы при относительно быстром изменении положения системы в пространстве. Задача не может быть полностью решена за счет использования конструкционных материалов (в том числе, особых) и конструктивных решений на основе таких материалов.

Вследствие этого, проблема решается использованием активной системы стабилизации, позволяющей в реальном времени контролировать и корректировать положение компонентов основной оптической системы.

Типовая оптическая система является двухзеркальной, состоящей из крупногабаритного главного зеркала и вторичного зеркала меньших размеров. Исходя из этого, вторичное зеркало устанавливается на подвижном управляемом механизме, производится контроль положения вторичного зеркала относительно главного и, при необходимости, положение вторичного зеркала корректируется вышеупомянутым механизмом.

В классической схеме системы стабилизации применяется отдельный контроль трех составляющих взаимного расположения главного и вторичного зеркал – наклона, поперечного смещения, продольного смещения – с использованием трех систем разного типа (автоколлимационный метод контроля наклона с использованием плоского отражающего элемента, расположенного на оправе вторичного зеркала; визирного метода контроля поперечного смещения положения контрольной точки на оправе вторичного зеркала; контроль качества изображения для определения продольного смещения вторичного зеркала), работающих последовательно.

В инновационной схеме использовано то свойство, что вторичное зеркало само является отражающим компонентом. Луч от излучателя, расположенного на главном зеркале, отражается от вторичного зеркала и попадает на приемник, расположенный также на главном зеркале. Используется комбинация из нескольких пар «излучатель-приемник». Для большинства оптических систем контроль положения луча на приемниках с использованием соответствующего математического аппарата и программного обеспечения позволяет одновременно определить все три составляющих взаимного расположения зеркал и одновременно провести их коррекцию.



В инновационной схеме по сравнению с классической схемой может быть или уменьшено общее время коррекции взаимного расположения зеркал, или увеличена точность этой коррекции, за счет усреднения больших результатов за то же время.

## **DESING OF HIGH-ACCURACY LARGE-SIZED OPTICAL SYSTEM WITH INNOVATIVE GEOMETRY STABILITY SYSTEM**

**O.V. Ponin, I.R. Galyavov, A.A. Sharov, A.V. Domnin**  
SC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Russia

The innovative monitoring system of a mutual position of optical elements of large-sized optical systems as part of active system of ensuring stability of this mutual position is described.

## **ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИАПАЗОНАХ**

**Патрикеев В.Е., Морозов А.Б., Судариков И.Н.**

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
Московская обл., г. Лыткарино, Россия  
Инновационные проекты. Продукция двойного назначения:  
технологии, продукты, решения

Рассмотрены основные особенности оценки качества оптических деталей в четырёх пространственно-частотных диапазонах. Проведён поиск измерительного оборудования, разработаны алгоритмы калибровки, а также обработки результатов измерения.

Крупногабаритные оптические детали преимущественно используются при создании оптико-электронных комплексов специального назначения и оптических систем для научных исследований. Ввиду разнообразия областей применения таких оптических изделий, необходимо обеспечить высокое качество оптики, минимизировав такие параметры искажения волнового фронта как PV и RMS, а также параметры качества поверхностей в контексте пространственно-частотных диапазонов.

Искажения волнового фронта условно можно подразделить на низкочастотные (регулярные ошибки), средне- и высокочастотные составляющие, а также шероховатость оптической поверхности.

При рассмотрении объективов телескопов важной характеристикой является пятно рассеяния оптической системы. В этом случае величины средне- и высокочастотных ошибок поверхностей являются показателями, влияющими на диаметр пятна рассеяния,



и чем они меньше, тем большая концентрация энергии будет обеспечена в меньшем пятне рассеяния.

Высокие значения средне- и высокочастотных ошибок могут быть критичными при рассмотрении излучения с высокой мощностью и энергией и могут вызвать внутренние повреждения материала, вызванные перефокусировкой излучения.

Параметр шероховатости оказывает большое влияние на рассеяние, особенно при работе с излучением большой мощности. Также от параметра шероховатости зависит качество нанесения покрытия.

В рамках исследования искажений волнового фронта в различных пространственных масштабах были определены значения показателей качества поверхностей для основных 4-х диапазонов и взаимосвязь этих значений с измерительным оборудованием. Следующие пространственно-частотные диапазоны и требования к ним определены в таблице 1.

**Таблица 1.** Основные параметры к качеству поверхностей оптики в 4-х пространственно-частотных диапазонах

Пространственно-частотный диапазон	Требования к качеству поверхности силовой оптики	Требования к качеству поверхности астрономической оптики	Требования к качеству поверхности оптики специального назначения
I (низкочастотная область искажений) более 12,6 периодов на апертуру	0,3 длины волны PV Градиент 7 нм/см (RMS)	0,035 длины волны RMS	0,025 длины волны RMS
II (среднечастотная область искажений) 12,6 – 166 периодов на апертуру	5 нм	0,015 длины волны RMS	0,012 длины волны RMS
III (высокочастотная область искажений) 166 – 275 периодов на апертуру	5 нм		
IV (область шероховатость) 0,12 мм – 0,01 мм	0,4 нм	2 нм	1 нм

Для проведения измерений были разработаны стенды контроля искажений волнового фронта в 4-х пространственных диапазонах для оптики с плоскими поверхностями и линзовой оптики.

Рассмотрен алгоритм абсолютной калибровки, учитывающий особенности измерения низкочастотных искажений волнового фронта. Предложена реализация измерения низкочастотных (НЧ) искажений с использованием данного алгоритма калибровки, основанного на взаимном перемещении эталонной и контролируемой оптики друг относительно друга в направлениях перпендикулярных оптической оси, с последующим восстановлением карты абсолютных искажений волнового фронта по измерениям за счёт сдвига.

При измерении средне- и высокочастотных искажений волнового фронта были рассмотрены основные факторы влияния, такие как материал оптических деталей, технология полирования и др. Предложен алгоритм калибровки измеренных значений искажений волнового фронта, основанный на измерении искажений волнового фронта эталонной

оптической поверхности, которые в средне- и высокочастотной области не превышают 1,5 нм по параметру RMS. При последующем вычитании результатов измерения эталонной поверхности из результатов измерений контролируемой поверхности, устраняются искажения, вызванных оптикой внутри интерферометра что позволяет измерить искажения на уровне 5 нм по параметру RMS. В рамках работы были также рассмотрены алгоритмы вычисления функции спектральной плотности корреляционной функции (PSD).

Для контроля параметров шероховатости рассмотрен способ измерения при помощи оптического профилометра, построенного на базе интерферометра Линника. Разработан стенд контроля шероховатости оптических полированных поверхностей со среднеквадратическим отклонением менее 0,4 нм.

## **TWAVEFRONT ERROR ESTIMATION OF LARGE-SCALED OPTICAL PARTS IN FOUR SPATIAL FREQUENCY RANGES**

**Patrikeev V.E., Morozov A.B., Sudarikov I.N.**

SC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Russia

Considered the basic features of optical quality estimation of optical parts in four spatial frequency ranges. Searched the metrology equipment, developed calibration and post-processing algorithms of measurement results.

## **ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ АО ЛЗОС ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЗЕРКАЛ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ**

**Абдулкадыров М.А., Владимиров Н.М., Добриков Н.С.,  
Патрикеев В.Е., Семенов А.П.**

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
Московская обл., г. Лыткарино, Россия

Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении

Инновационные технологические решения АО ЛЗОС при изготовлении крупногабаритных зеркал из карбида кремния позволили добиться качества изделий не уступающего импортным аналогам и сократить отставание России в области производства оптико-электронных комплексов с использованием перспективных материалов.

### **Введение**

Главная задача при создании большей части оптических систем – производство зеркального объектива высокого качества.

Одной из ключевых задач для создания таких объективов, для которых требуются крупногабаритные отражатели, является разработка и создание облегченных материа-

лов, обладающих высокой удельной прочностью, высокой удельной жесткостью, низким коэффициентом теплового расширения и высоким коэффициентом теплопроводности.

В России в начале 70-ых была проведена оценка нескольких вариантов, таких как плавленый кварц, стеклокерамика, бериллий и карбид кремния.

Исследования показали, что карбид кремния имеет неоспоримое преимущество перед традиционными материалами. Этот вывод согласуется с более поздними выводами зарубежных специалистов, которые интенсивно работают в этом направлении. В качестве примера можно привести программу Министерства обороны США AMSD (Advanced Mirror System Demonstrator), в рамках которой велись масштабные работы по выбору материала и созданию базовых технологий для изготовления силовых и крупногабаритных охлаждаемых облегченных зеркал. Программа дала основание для широкомасштабных исследований этого вопроса в Германии, Франции, Японии, США. Сегодня технология изготовления оптических систем из карбида кремния успешно развивается и в Китае. Этот вывод реализован индустриально развитыми странами при создании десятков оптико-электронных систем нового поколения.

В рамках работ, проводимых на АО ЛЗОС был проведен тщательный анализ существующих в России и мире технологий по изготовлению зеркал из карбида кремния.

Для изготовления крупногабаритных облегченных оптических элементов в разное время использовались 3 различных технологии. Их можно разделить на три поколения по времени разработки и технологическому уровню сложности:

– **первое поколение** – технология изготовления зеркал из **реакционносвязанного карбида кремния** с использованием **шликерного литья (LPSiC)**: формование заготовки без давления, температура изготовления около 1800°C;

– **второе поколение** - технология изготовления зеркал из **реакционносвязанного карбида кремния** с использованием **гидростатического прессования** заготовок (**SiSiC**): формование заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 1800°C;

– **третье поколение** - технология изготовления зеркал из **спеченного карбида кремния** с использованием **гидростатического прессования** заготовок (**SSiC**): формование заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 2100°C.

**Карбид кремния третьего поколения (SSiC- спеченный карбид кремния)** имеет ряд существенных преимуществ перед карбидами 1-го и 2-го поколения, а именно: высокая однородность, трещиностойкость, отсутствие остаточных внутренних напряжений, хорошая обрабатываемость, небольшая величина остаточной микрошероховатости, позволяющая использовать зеркала, изготовленные из этого материала не только в инфракрасном, но и **в видимом диапазоне длин волн**.

В России на данный момент присутствует существенное технологическое отставание и имеется только технология шликерного литья (LPSiC) – технология 1-го поколения, появившаяся около тридцати лет назад. За последние годы технология не совершенствовалась и, более того, есть все предпосылки, что она будет утеряна, т.к. за последние 10 лет в России не было сделано ни одного крупногабаритного зеркала, пригодного к применению в оптико-электронных комплексах.

В связи с этим в АО ЛЗОС были поставлены работы, направленные на устранение технологического отставания от зарубежных стран в области изготовления зеркал из

карбида кремния. В рамках работ были применены инновационные технологические решения, позволившие добиться качества изделий, не уступающего импортным аналогам.

### Структурная схема

Структурная схема технологического процесса представлена на рис. 1.

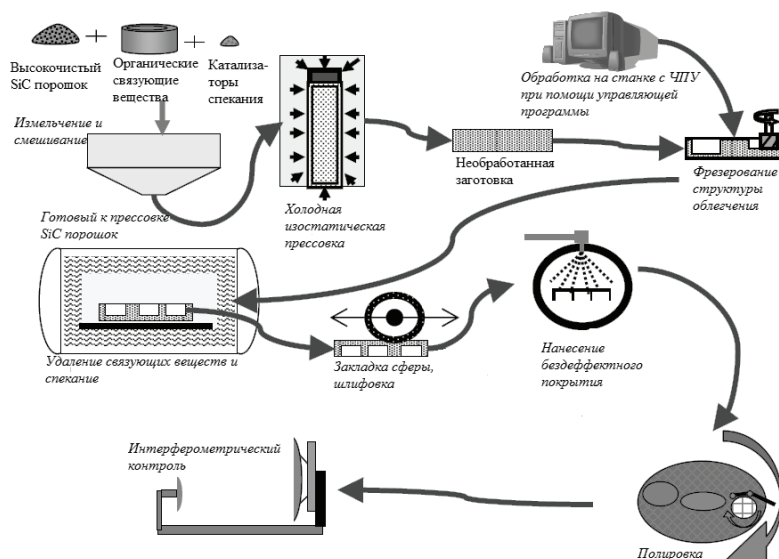


Рисунок 1.

Структурная схема технологического процесса

К инновационным решениям, разработанным в АО ЛЗОС можно отнести:

- Использование высокочистого сырья, органических добавок и катализаторов спекания. От состава исходного сырья зависит 50% успеха получения качественных заготовок. Эта стадия является ключевой для проведения дальнейших этапов.

- Применение в качестве метода формования холодного изостатического прессования с давлением до 150 МПа. При этом прессуется цельная заготовка, из которой в дальнейшем выфрезеровываются излишки материала (до 80%) до получения финального дизайна. К плюсам такого подхода можно отнести: высокую однородность материала после стадии спекания, малое время изготовления структуры облегчения (обработка в 20-30 раз быстрее чем, если бы она проводилась после спекания, т.к. после прессовки материал хорошо поддается обработке; изготовление структуры облегчения для крупногабаритного зеркала из стекла занимает от нескольких месяцев до полугода, для аналогичного зеркала из карбида кремния от нескольких дней до 1-2 недель).

- Использование специального твердосплавного инструмента с алмазным покрытием, позволившее улучшить качество и скорость обработки прессованных заготовок.

- Разработку технологических процессов спекания для получения максимально беспористых образцов.

- Разработку инновационных методов обработки исполнительных поверхностей с получением шероховатости до 1 нм (Ra).

Применение технологии третьего поколения (спеченный карбид кремния SSiC) позволило изготовить крупногабаритные зеркала с оптическим качеством, которые могут работать не только в ИК, но и в видимом диапазоне длин волн.

## Показатели качества

Материалы на основе карбида кремния обладают уникальным сочетанием физико-механических характеристик, позволяющих создавать принципиально новые конструкции крупногабаритной оптики, включая не только оптические зеркала, но и элементы конструкции аппаратуры.

Основными особенностями и преимуществами карбида кремния являются:

- высокая удельная жесткость и прочность (в 4-5 раз выше чем у стеклокерамики), позволяющая создавать сверхоблегченные самонесущие тонкостенные конструкции. Вышеуказанное свойство обеспечивает высокую размерную стабильность всего оптико-электронного комплекса при динамических нагрузках (вибрационных, ударных и т.д.) в реальных условиях эксплуатации;

- высокая теплопроводность (в 100 раз выше чем у астроситалла), позволяющая мгновенно перераспределяться температуре по всему объему элементов оптико-механической системы, что позволяет избежать ухудшения качества изображения, связанного с термическими деформациями исполнительных поверхностей. Эта особенность позволит создавать термостабилизированные системы, работающие в условиях криогенных и контрастных температур.

## Заключение

Зеркала и структуры из карбидокремниевой (SiC) керамики становятся все более и более важными для облегченных оптико-механических систем, которые должны работать при неблагоприятных условиях окружающей среды. Основными преимуществами таких зеркал являются следующие:

- Очень широкий диапазон рабочей температуры (от 4 до 1570 К)
- Низкая удельная плотность (2.6-3.1 г/см<sup>3</sup>)
- Высокая жесткость (240-400 ГПа) и прочность (300-450 МПа)
- Низкий коэффициент теплового расширения (КТР:  $2.1-2.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ )
- Высокая теплопроводность (~ 125-200 Вт/мК)
- Изотропные характеристики КТР, теплопроводности, механические свойств и т. д.
- Очень высокая устойчивость к химическому воздействию и коррозии, отсутствие износа или деформации ползучести при нагрузке
- Быстрая и дешевая обработка, короткие сроки производства, значительная гибкость в структурном дизайне
- Возможность ультра-облегчения (малая толщина стенки и комплексные элементы жесткости).

В ближайшей перспективе зеркала и элементы аппаратуры из карбида кремния существенно потеснят аналоги из классических материалов, что обеспечит получение высоких эксплуатационных характеристик разрабатываемых образцов ВВСТ и гражданской техники наземного и космического базирования.

## INNOVATIVE SOLUTIONS JSC LZOS IN THE PRODUCTION OF MIRRORS MADE OF SILICON CARBIDE

**Abdulkadyrov M.A., Vladimirov N.M., Dobrikov N.S., Patrikeev V.E.,  
Semenov A.P.**

SC «Lytkarino Optical Glass Factory» (LZOS), Lytkarino, Russia

## **ВНЕОСЕВЫЕ ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОЛЛИМАТОРЫ С РАБОЧИМ ПОЛЕМ 200÷1000 ММ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

**Горшков В.А., Невров А.С., Морозов И.С.**

АО НПО «Оптика», г. Москва, Россия  
Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении

Внеосевые зеркальные коллиматоры предназначены для создания плоского эталонного волнового фронта в широком диапазоне спектра: от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) излучения.

Преимущества внеосевых коллиматоров (ВК) в том, что их зеркальная система не имеет дополнительных оптических компонентов, устанавливаемых в коллимированном пучке.

В статье указан состав коллиматоров, представлены технические характеристики внеосевых зеркальных коллиматоров, изготовленных в АО «Научно-производственное объединение «Оптика».

## **ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ЛИНЗ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Горшков В.А., Васильева Е.Ю., Морозова А.В.**

АО НПО «Оптика», г. Москва, Россия  
Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении

В докладе рассматривается способ изготовления и контроля преобразователя лазерного излучения, формирующего пучок с равномерным распределением интенсивности, состоящего из двух асферических линз, профили поверхностей которых описываются уравнениями высшего порядка. Проводится анализ влияния ошибки асферизации на распределение интенсивности в выходном пучке.

Преобразователь гауссова пучка в супергауссов позволяет преобразовывать лазерное излучение с гауссовым распределением интенсивности в коллимированный пучок с равномерным распределением интенсивности. Существует несколько методов формирования лазерного пучка требуемой формы, в том числе простые отверстия, которые вырезают наиболее плоскую часть лазерного пучка, дифракционные оптические элементы, линзы и зеркала. Выбор тех или иных методов зависит от оптических и конструктивных задач и различных технологий преобразования излучения.



# ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ РАДИОЛАЗЕРНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ И ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Садовников М.А. , Чубыкин А.А. , Шаргородский В.Д.

АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения» г. Москва, Россия  
Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении

Лазерные технологии, основанные на измерении двухпутевой дальности по оценкам времени прохождения сверхкоротких лазерных импульсов до объектов, оснащённых ретрорефлекторами, и обратно, играют ключевую роль при получении данных для решения задач:

- создания на основе глобальных геодезических наблюдений (в сети GGOS) геоцентрической системы координат с миллиметровой точностью;
- геодезического обеспечения и калибровки радиотехнических систем НКУ ГЛОНАСС;
- уточнения моделей влияния радиационных возмущений на движение космических аппаратов;
- уточнения влияния неоднородности геопотенциала на движение космических аппаратов;
- изучения влияния гравитационного поля Луны на движение космических аппаратов.

В АО «НПК «СПП» создаются инновационные технологии, основанные на комплексном использовании лазерных одно- и двухпутевых дальномерных измерений с радиотехническими кодовыми и фазовыми измерениями однопутевых дальностей (псевдодальностей), выполняемыми наземными беззапросными измерительными системами (БИС) ГЛОНАСС.

На основе этих технологий создаются радиолазерные комплексы (РЛК) фундаментального координатно-временного (РЛК «Точка») и оперативного эфемеридно-временного (РЛК «Сажень-Л» и «Сажень-К») обеспечения системы ГЛОНАСС.

В докладе рассматриваются особенности лазерных и радиолазерных технологий получения миллиметрового уровня точности применительно к задачам:

- измерения двухпутевой дальности до геодезических и навигационных спутников, а также до ретрорефлекторных систем на поверхности Луны;
- всепогодного сличения бортовых и наземных шкал времени с погрешностями уровня десятков пикосекунд на основе сравнения одно- и двухпутевых дальностей;
- синхронизации (передачи времени) субнаносекундной точности наземных эталонов времени, разнесённых на тысячи километров, с использованием наземных квантово-оптических систем, работающих в шкалах времени синхронизируемых эталонов и навигационных спутников, оснащённых измерителями псевдодальности оптического диапазона, и ретрорефлекторами.

Приводятся технические характеристики систем, создаваемых в рамках инновационных проектов фундаментального обеспечения ГЛОНАСС на основе дальнометрирования геодезических и навигационных спутников, а также Луны.

# ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ КОСМИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ПЕРЕДАЧИ ВРЕМЕНИ

**Барышников М.В., Садовников М.А., Чубыкин А.А.,  
Шаргородский В.Д.**

АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения» г. Москва, Россия  
Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении

Сличение шкал времени разнесённых на тысячи километров наземных эталонов времени с субнаносекундной точностью стало возможным благодаря инновационной разработке космических (бортовых и наземных) лазерных систем измерения однопутевой дальности (псевдодальности) субсантиметровой точности.

В докладе приводятся результаты космического эксперимента, в котором, для сличения шкал разнесённых эталонов, выполнялись квазиодновременные сравнения шкал времени синхронизируемых эталонов со шкалой времени спутника ГЛОНАСС на основе сравнения измерений одно- и двухпутевых дальностей по лазерным сигналам наземных квантово-оптических станций сигналы «Старт», которых фиксируются в шкалах времени синхронизируемых эталонов, а сигналы «Стоп» - в шкалах времени спутника и наземных эталонов.

Расхождение шкал времени синхронизируемых эталонов определяется как алгебраическая разность расхождений времени шкал времени каждого из эталонов и спутника.

В эксперименте задействовано четыре наземных эталона, связанных с квантово-оптическими системами (два - в московском регионе, а также - в Алтайском крае и на Дальнем Востоке).

Выполнялось сличение шкал наземных (центральных) синхронизаторов системы ГЛОНАСС между собой и со шкалой времени UTC SU.

Особенность данной технологии состоит в необходимости высокоточной компенсации влияния:

- взаимных перемещений спутника и наземных станций за время распространения лазерных сигналов (т.е. введение высокоточных баллистических поправок);
- релятивистских эффектов;
- приборных задержек сигналов в бортовой и наземной аппаратуре.

Приводится описание созданных и проектируемых систем передачи времени, схем и результатов космического эксперимента.

## МОДУЛЬ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА В РАМКАХ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА IMAGE MEDIA CENTER

**Лобзенёв В.Н., Карпенко Е.С., Земсков В.Ф., Ярцева А.А.**

ООО «Центр инновационных технологий», г. Москва, Россия  
Обработка данных ДЗЗ с различных КА и оценка качества

Космические системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивают сбор данных в глобальном масштабе с высоким пространственным и спектральным разрешением, однако для достижения наилучшего результата управления данными необходима возможность не только доступа к массивам данных, но и их быстрая и качественная обработка с последующей оценкой качества выходных данных.

В настоящее время активно развиваются и используются космические системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Требования к качеству получаемой информации значительно повышаются. Появление новых КА требует создания и совершенствования новых программно-аппаратных средств для обработки материалов ДЗЗ и извлечения скрытой полезной информации из непрерывно растущего объема пространственных данных.

Российский инновационный программный комплекс IMAGE MEDIA CENTER (ПК ИМС) по обработке и оценке качества изображений, получаемых целевой аппаратурой КА ДЗЗ, позволяет значительно снизить временные и стоимостные ресурсы.

При использовании оценки качества изображения определяется его пригодность для решения различных прикладных задач. В качестве решаемых прикладных задач могут быть задачи функционирования системы наблюдения ДЗЗ на этапах летно-конструкторских испытаний и штатной эксплуатации.

Области возможного применения комплекса оценки качества:

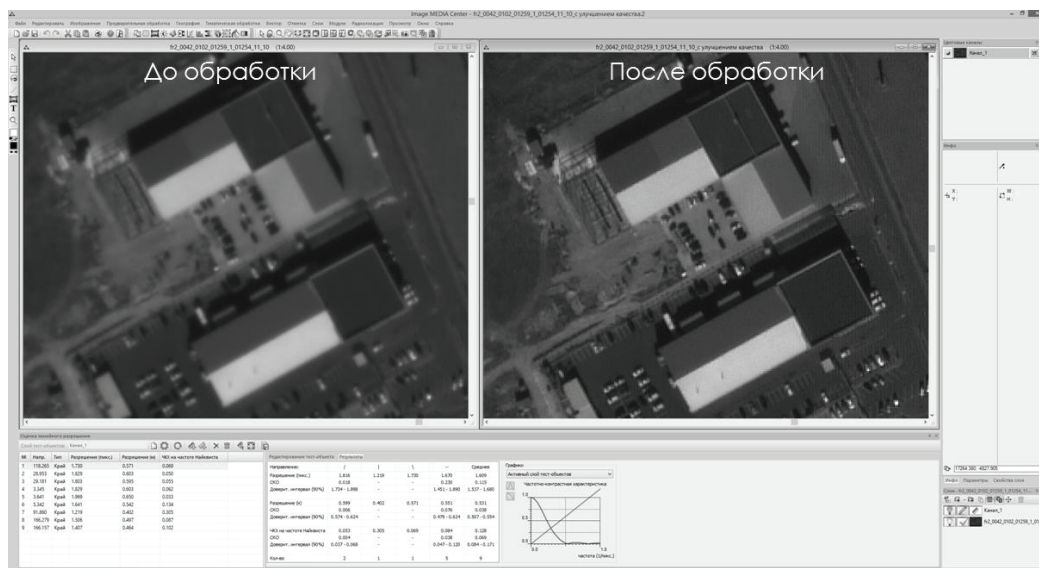
- испытание и настройка систем ДЗЗ;
- оценка информативности изображений;
- определение возможности решения прикладных задач (строительных, картографических и других);
- улучшение качества изображений с использованием результатов оценки качества.

Программный модуль оценки качества материалов обеспечивает проведение измерений и расчет ряда характеристик и параметров, определяющих качество космических снимков.

ПК ИМС включает в себя следующие модули по оценке качества:

- оценка пространственно-частотных характеристик в оптическом и ИК диапазонах;
- оценка пространственно-частотных характеристик в радиолокационном диапазоне;
- оценка спектрорадиометрических характеристик в оптическом и ИК диапазонах;
- оценка спектрорадиометрических характеристик в радиолокационном диапазоне;
- оценка координатно-измерительных характеристик.

Оцениваемыми материалами являются оптические снимки в видимом и ближнем ИК диапазонах и радиолокационные снимки.



**Рисунок 1.**

Повышение детальности в ПК ИМС:  
слева – до обработки, справа – результат обработки

На рисунке 1 в качестве примера представлены изображения до и после обработки. В данном случае были использованы исходные панхроматические материалы КА «Ресурс-П» №1 аппаратуры «Геотон» уровня обработки 1А с проекцией пиксела 0,7 м. Далее в ПК ИМС была проведена обработка с целью повышения детальности изображения. Проекция пиксела обработанного снимка составила 0,35 м.

В результате проведенных измерений с использованием модуля оценки пространственно-частотных характеристик в оптическом диапазоне линейное разрешение исходных материалов с проекцией пиксела 0.7 м составило 1.19 м, линейное разрешение обработанных материалов в ПК ИМС с проекцией пиксела 0.35 м составило 0.61 м. При наличии спектральных каналов возможно получение цветосинтезированного (RGB) изображения с линейным разрешением 0.6 – 0.7 м.

Проведенная оценка показала:

- обработанные в ПК ИМС материалы обладают повышенным качеством и по информативности сравнимы с материалами зарубежных аналогов КА сверхвысокого разрешения;

- обработанные материалы обладают улучшенными дешифровочными свойствами, детальность объектов на снимках повышена;

- обработка не влияет на точность определения координат объектов на снимке в плане.

В результате проведенных измерений в автоматическом режиме формируется отчет по оценке качества, включающий в себя необходимую информацию в зависимости от использования определенного модуля.

На рисунке 2 представлен пример отчета по оценке пространственно-частотных характеристик в оптическом и ИК диапазонах.

Использование программного комплекса для определения качества материалов космической съемки позволяет определять круг задач, для решения которых могут быть использованы данные изображения. Таким образом появляется возможность заранее

Информация о снимке		Результаты оценки						
Название файла	0041_0102_10055_1_00098_03_ORТ_8bit.img	Направление	/		\	--	Среднее	
Тип слоя	Панхроматический	Разрешение (микс.)	Среднее	1.356	1.411	1.256	1.294	1.330
Название слоя	0041_0102_10055_1_00098_03_ORТ_8bit		СКО	0.223	0.158	0.201	0.165	0.189
Название канала	Канал_1		Доверит. интервал (90%)	1.270 - 1.442	1.320 - 1.503	1.165 - 1.348	1.224 - 1.364	1.290 - 1.370
Наименование КА	Ресурс-П.№1	Разрешение (м)	Среднее	1.356	1.411	1.256	1.294	1.330
Тип сенсора	GEOTONP		СКО	0.223	0.158	0.201	0.165	0.189
Уровень обработки	2A		Доверит. интервал (90%)	1.270 - 1.442	1.320 - 1.503	1.165 - 1.348	1.224 - 1.364	1.290 - 1.370
Географическая проекция	Transverse Mercator	ЧКХ на частоте Найквиста	Среднее	0.055	0.033	0.103	0.063	0.064
К-ты левого верхнего угла	380744.716920, 6227641.370165		СКО	0.055	0.031	0.085	0.052	0.122
К-ты правого верхнего угла	439860.716920, 6227641.370165		Доверит. интервал (90%)	0.033 - 0.076	0.015 - 0.051	0.064 - 0.142	0.041 - 0.085	0.038 - 0.089
К-ты правого нижнего угла	439860.716920, 6127078.370165	Количество тест-объектов	20	10	15	17	62	
К-ты левого нижнего угла	380744.716920, 6127078.370165	Функция рассеяния линии		Частотно-контрастная характеристика				
Проекция пиксела (м)	1.00							
Тип пиксела	unsigned char ( 8 bits )							
Условия съемки								
Дата съемки	12/4/2015							
Время съемки	11:28:10							
Параметры расчета пространственного разрешения								
Количество штрихов марки	3							
Пороговое отношение сигнал/шум	4.00							
СКО штриха	0.50							
Среднее значение пиксела	43.99							
Контраст тест-объекта	0.14							

Рисунок 2.

Пример отчета по оценке качества пространственно-частотных характеристик в оптическом и ИК диапазонах

определить необходимость приобретения тех или иных снимков и снизить затраты на покупку космических изображений.

Преимущества использования разработанного комплекса оценки качества:

- оценка различных характеристик в едином комплексе;
- снижение времени работы оператора за счет автоматизации процесса оценки;
- автоматическое формирование паспорта качества снимка;
- использование комплекса для решения широкого круга задач:
- испытание и настройка систем ДЗЗ;
- оценка информативности изображений;
- определение возможности решения прикладных задач (строительных, картографических и других);
- улучшение качества изображений с использованием результатов оценивания качества;
- оценка и сравнение снимков с различных космических аппаратов;
- оценка снимков различных форматов;
- предназначен для операторов КА и пользователей снимков.

## QUALITY CONTROL MODULE IN IMAGE MEDIA CENTER SOFTWARE

Lobznev V., Karpenko E., Zemskov V., Yartseva A.

«Innovative center» LLC, Russia, Moscow

Earth remote sensing systems provide a vast amount of spatial data with different spectral and spatial resolution. However, aside from easy access to data storages effective data management requires fast and productive processing tools together with output data quality control possibilities.

## **Секция № 2**

**Инновационные проекты.  
Гражданская продукция:  
технологии, продукты, решения, услуги**



# МОДУЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПРОГРАММНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ ДЗЗ

Сальникова М.А.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия  
Применение математических методов исследования в технических науках

Для создания цифровой модели оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ разработан модуль взаимодействия между программным комплексом конечно-элементного моделирования и программой расчета оптических систем. Данный модуль войдет в общую цифровую модель изделия и позволит оценивать качество оптической системы и его изменение в различных режимах работы.

## Введение

Создание оптико-электронных комплексов космического базирования является перспективным направлением современного приборостроения. В общем случае разработка объективов таких комплексов (в особенности крупногабаритных) – это сложная научно-техническая задача.

В настоящее время, в условиях быстрого развития технологий, сроки разработки оптико-электронных комплексов необходимо сокращать, поэтому ускорение процесса синтеза и анализа конструкции объективов оптико-электронных комплексов является чрезвычайно актуальной задачей космического приборостроения.

Одной из возможностей сокращения затрат времени на проектирование оптико-электронных комплексов является разработка алгоритмов взаимодействия между программными комплексами ANSYS и Zemax. Данные алгоритмы позволят проводить оценки изменения качества изображения оптических систем с учетом их конструктивных особенностей и внешних воздействий на оптико-электронные комплексы.

## Структурная схема

Разработанный модуль состоит из указанных на рисунке 1 блоков и работает в следующей последовательности. Первоначально производится расчет детали в комплексе конечно-элементного моделирования, в нашем случае это CAE ANSYS. Текстовый файл, в котором записана экспортированная из CAE ANSYS конечно-элементная сетка [1], является входным файлом для разработанного модуля. Первый блок – блок чтения считывает и преобразует ее.

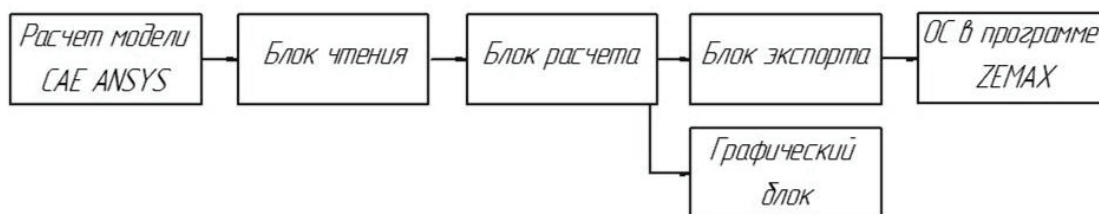


Рисунок 1.  
Структурная схема

Второй блок – блок расчета производит аппроксимацию поверхности. Как известно в программном комплексе Zemax есть несколько типов поверхностей, позволяющих задать произвольную поверхность. Выделим из них две: Grid Sag и Zernike Standard Sag. Первая из них задает поверхность по прогибам в точках на прямоугольной сетке, вторая – задает поверхность по прогибам полиномами Цернике.

Применительно к поверхности Grid Sag, в общем случае, необходимо рассчитать координаты точки поверхности по имеющемуся набору заданных точек конечно-элементной сетки. Для этого можно использовать, билинейную интерполяцию, строящую плоскость через три соседние известные точки, или еще более подходящую бикубическую интерполяцию, строящую поверхность через шестнадцать ближайших точек, однако, для случая неравномерной непрямоугольной сетки ее применение затруднительно.

Поверхность Zernike Standard Sag [2], используемая в программе Zemax, – это поверхность, которая описывается уравнением четной асферики и дополнительными асферическими членами, записанными через коэффициенты Цернике стандартного полиномиального ряда. Через нее могут быть заданы так же плоские, сферические и асферические поверхности второго порядка. Для описания поверхности рассчитывается 231 коэффициент при полиномах.

Третий блок – блок экспорта формирует выходной файл и записывает его в формате пригодном для загрузки в программу Zemax. Четвертый блок – графический, предназначен для отображения аппроксимированной поверхности и точек входного файла, импортированного из ANSYS. Основная задача данного блока: дать представление о форме загруженной поверхности и информацию о том, что приближение велось правильно или оно провалилось из-за неверных начальных данных.

### Показатели качества

В настоящее время в мире наиболее распространенными программами, осуществляющими подобное взаимодействие между комплексами САЕ и оптическими программами, являются SigFit и OOFELIE. Однако данные программы являются импортными, имеют большую стоимость, поэтому их использование в создаваемой общей цифровой модели комплекса существенно затруднено.

Результаты работы модуля предлагается оценить на примере решения тестовой задачи. На рисунке 2 – представлена трехмерная модель оптической системы. Для примера заменяется ее первое зеркало. На рисунке 3 приведена МПФ исходной системы. Рисунок 4 отражает пятна рассеяния в исходной оптической системе.

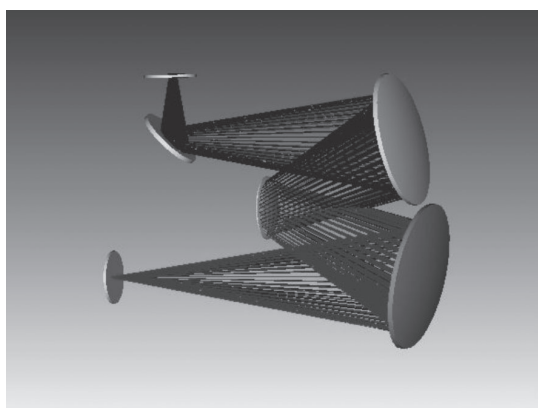


Рисунок 2.

Трехмерная модель тестовой системы

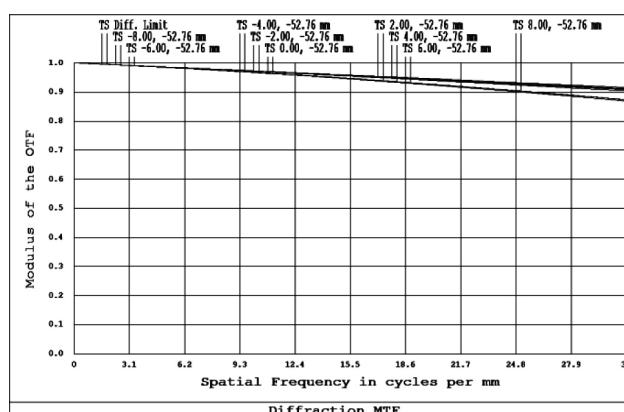
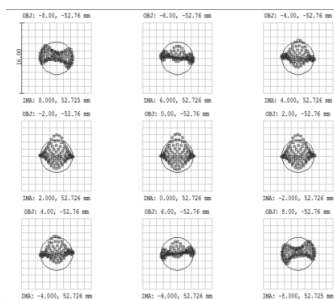
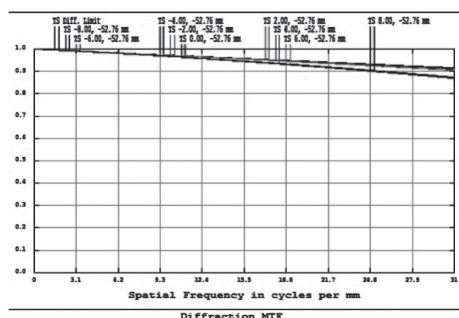


Рисунок 3.

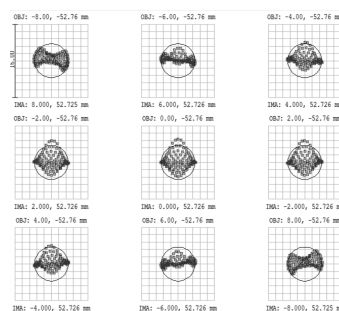
МПФ исходной системы



**Рисунок 4.**  
Пятна рассеяния исходной оптической системы



**Рисунок 5.**  
МПФ оптической системы  
с замененной поверхностью



**Рисунок 6.**  
Пятна рассеяния оптической системы  
с замененной поверхностью

После замены первой зеркальной поверхности на Zernike Standard Sag получаем следующие результаты по МПФ (рисунок 5) и пятнам рассеяния (рисунок 6) соответственно.

### Заключение

Предложенная функциональная структура взаимодействия между программными комплексами ANSYS и Zemax позволит на этапах проектирования и создания оптико-электронного комплекса проводить оценку изменения качества изображения оптической системы под действием внешних факторов. В результате упростится и ускорится принятие конструкторских и технологических решений, определяющих, в конечном итоге, сложность и реализуемость космической оптико-электронной аппаратуры.

### Список литературы:

1. ANSYS 15.0 User's Guide.
2. Zemax Optical Design Program 2011 User's Manual

## THE MODULE OF INTERACTION BETWEEN SOFTWARE COMPLEXES OF FINITE-ELEMENT MODELING AND OPTICAL SYSTEMS DESIGN FOR THE CREATION OF DIGITAL MODEL OF OPTOELECTRONIC EARTH REMOTE SENSING EQUIPMENT

**Salnikova M.A.**

PAO «Krasnogorskiy zavod im. S.A. Zvereva», Krasnogorsk, Russia

For the creation of digital model of optoelectronic earth remote sensing equipment the module of interaction between software complexes of finite-element modeling and optical systems design is developed. This module will be included in the common digital model of the equipment and allows evaluating the quality of the optical system and its change in different modes of operation.

# УСТАНОВКА ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ТКАНЕЙ ГЛАЗНОГО ДНА

Модель С.С., Савельева Т.А.\*, Линьков К.Г.\*, Лощенов В.Б.\*

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия

\*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт общей физики им. А.М. Прохорова

Российской академии наук, г. Москва, Россия

Инновационные спектроскопические методики в офтальмологии

Разработана многофункциональная лазерная установка для проведения флуоресцентной диагностики (ФД) тканей глазного дна, а также фотодинамической терапии (ФДТ), позволяющая значительно ускорить процесс лечения сенильной макулодистрофии с неоваскуляризацией. Интраоперационный мониторинг концентрации фотосенсибилизатора в процессе ФДТ позволяет повысить эффективность лечения и избежать повреждения здоровых тканей.

## Введение

В настоящее время развитие методов и инструментов лечения офтальмологических заболеваний является важным направлением биомедицинских исследований. В частности, актуально совершенствование подходов к лечению распространенной среди взрослого населения сенильной макулодистрофии с неоваскуляризацией, наносящий существенный вред центральному зрению.

Существуют различные подходы лечению этого заболевания. Применяют как консервативную терапию, так и лазерную коагуляцию, однако наиболее безопасным методом является ФДТ, поскольку мощность применяемого в этом случае лазерного излучения значительно ниже, чем в случае лазерной коагуляции [1].

Используемые для ФДТ фотосенсибилизаторы (ФС) обладают свойством накапливаться в патологических тканях, кроме того некоторые из них также обладает флуоресцентными свойствами. Это позволяет проводить флуоресцентную диагностику и точно локализовать пораженные области.

## Структурная схема

Разработанная офтальмологическая установка [2] предназначена для проведения ФД и ФДТ с отечественным ФС «Фотосенс», обладающим флуоресцентными свойствами. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

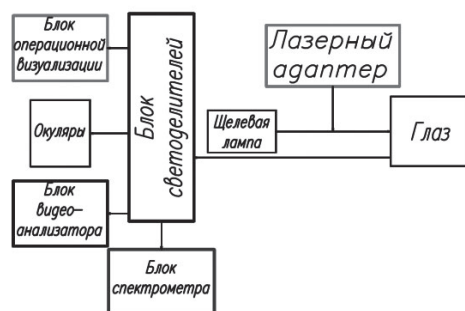
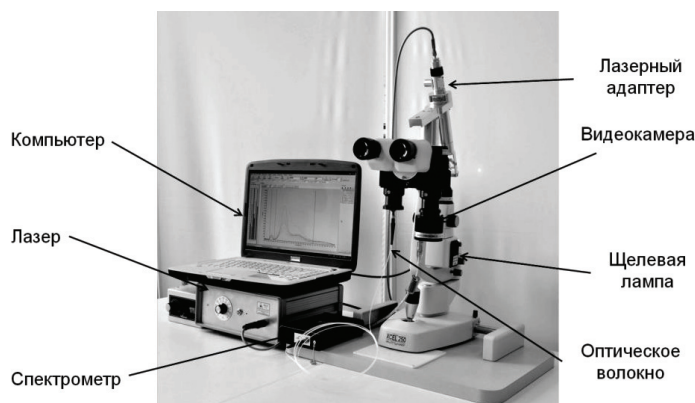


Рисунок 1. Структурная схема установки

Установка построена на базе щелевой лампы – интраоперационного офтальмологического микроскопа и содержит адаптер, формирующий на глазном дне лазерное пятно. Адаптер построен по схеме равно освещения по Келлеру, таким образом обеспечивается высокая равномерность освещенности. При проведении ФД это крайне важно, поскольку неравномерность освещенности различных областей глазного дна может привести к появлению фантомных патологических областей на флуоресцентном снимке, вследствие чего возникает риск повреждения здоровых тканей. Также данный подход позволяет выполнять количественные измерения концентрации ФС в тканях глазного дна, в том числе интраоперационно [3,4]. Адаптер имеет два режима функционирования: диагностический, с размером рабочего пятна  $d=4..12$  мм и терапевтический, с  $d=100..300$  мкм. В адаптер интегрирован канал устройства автоматизированного контроля дозы излучения.

В состав установки входит блок визуализации и спектроскопической диагностики, содержащий призмный светоделитель и две камеры – цветную и высокочувствительную черно-белую. Цветная камера служит для регистрации качественного полноцветного изображения глазного дна. Перед высокочувствительной камерой установлен светофильтр, позволяющий выделить флуоресцентный сигнал. Изображения камер комлексируются и выводятся на дисплей компьютера.

В установке предусмотрена возможность установки канала волоконного спектрометра, позволяющего получать спектры флуоресценции или диффузного отражения от локальных зон глазного дна. Такой подход позволяет расширить функциональность установки и выполнять с ее помощью спектроскопические исследования биотканей с различными типами источников излучения. Внешний вид установки представлен на рис. 2.



**Рисунок 2.**

Внешний вид системы

### **Показатели качества**

В настоящее время наибольшее распространение в офтальмологической практике получила ФДТ с использованием ФС “ Visudyne ”. Для этих целей обычно используются установки “ Coherent Opal Photoactivator ” с формирователем пятен “ LaserLink ” (“ Coherent ”, США) и “ Zeiss Visulas ” 690 s с адаптером “ Visulink - PDT ” (“ Carl Zeiss ”, США) на базе щелевых ламп. Данные системы не позволяют объединить процедуры ФД и ФДТ.

В таблице 1 приведен сравнительный анализ показателей качества разработанной установки и конкурирующих аналогов.



**Таблица 1.**

Показатели качества офтальмологических установок для ФДТ

№	Показатель качества	Coherent Opal Photoactivator	Zeiss Visulas 690 s Visulink - PDT	Akira Obana's et. al. system	Разработанная установка
1	Тип ФС	Visudyne	Visudyne	ATX-S10(Na)	Фотосенс
2	Количество каналов видеосистемы	1	1	2	2
3	Количественный контроль концентрации ФС	-	-	+	+
4	Возможность подключения спектрометра	-	-	-	+
5	Страна	США	Германия	Япония	Россия

**Закключение**

Разработанная установка представляет интерес для широкого круга офтальмологов. Преимуществом установки является возможность оперативного определения пространственного распределения фотосенсибилизатора в тканях глазного дна. Имея такую информацию, врач имеет объективные критерии для выбора правильного режима терапии. Кроме того, обеспечивается возможность проведения ФД и ФДТ в рамках одной процедуры, что ускоряет терапию. Возможность проведения детальных исследований состава биотканей делает систему привлекательной и для научно-исследовательских и учебных медицинских учреждений. Система может быть интегрирована в имеющееся в наличии оборудование, что позволяет снизить затраты.

**Список литературы:**

1. S.E. Avetisov, M.V. Budzinskaja, T.N. Kiseleva, N.V. Balatskaya, I.V. Gurova, V. B. Loschenov, S. A. Shevchik, S. G. Kuzmin, G. N. Vorozhtsov, *Proc. SPIE*, **6632**, 663212 (2007).
2. S.S. Model, T.A. Savelieva, K.G. Linkov, *Proc. SPIE*, **8699**, 86990E (2013).
3. A.A. Stratonnikov, N.E. Edinac, D.V. Klimov et al., *Proc. SPIE*, **2924**, с 49-60 (1996).
4. A.A. Stratonnikov, N.V. Ermishova, G.A. Meerovich, B.V. Kudashev, E.G. Vakoulovskaya, V.B. Loschenov, *Proc. SPIE*, **4613**, 162 (2002).

**APPARATUS FOR FLUORESCENT DIAGNOSTICS AND  
PHOTODYNAMIC THERAPY OF HUMAN EYE FUNDUS DISEASES**

**S. S. Model, T. A. Savelieva\*, K. G. Linkov\*, V. B. Loschenov\*.**

Public Joint Stock Company «Krasnogorsky Zavod», Krasnogorsk, Russia

\*A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russia

We developed apparatus for fluorescence diagnostics and photodynamic therapy of human eye fundus diseases. It allows to accelerate treatment of senile macular degeneration with neovascularization. Intraoperative monitoring of photosensitizer concentration improves treatment effectiveness and reduces the risk of damage to healthy tissue.



# ЛАЗЕРНЫЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

Тарасишин А.В., Бездидько С.Н., Складаров С.Н.,  
Кушнарев К.Г., Мишин С.В.

ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск, Россия  
Оптические измерения

В настоящем докладе представлен универсальный оптико-электронный прибор, предназначенный для проведения угловых и линейных измерений при юстировке оптических систем, а также для контроля погрешностей центрирования линз объективов видимого, ближневолнового, средневолнового и длинноволнового диапазонов инфракрасного излучения.

В наши дни инфракрасные оптические системы находят широчайшее применение и с успехом используются не только в различных областях науки и техники (таких как медицина, дистанционное зондирование Земли, энергетика, картография, спектроскопия и т.д.), но и в военном деле [1]. К объективам данных систем предъявляются высокие требования по качеству изображения. Погрешности центрирования линз, возникающие на этапах изготовления и сборки, как правило, приводят к значительному снижению качества изображения [2]. В связи с этим, актуальной является задача автоматизированного контроля и измерения погрешностей центрирования линз объективов инфракрасной оптики. Лазерный Автоколлимационный Микроскоп представляет собой универсальный оптико-электронный прибор, предназначенный для автоматизированного контроля и измерения погрешностей центрирования, как отдельных линз, так и линз, входящих в состав многоэлементных объективов, работающих как в видимом, так и в ближнем, среднем и дальнем диапазонах инфракрасного излучения.

Оптическая схема Лазерного Автоколлимационного Микроскопа представлена на рисунке 1.

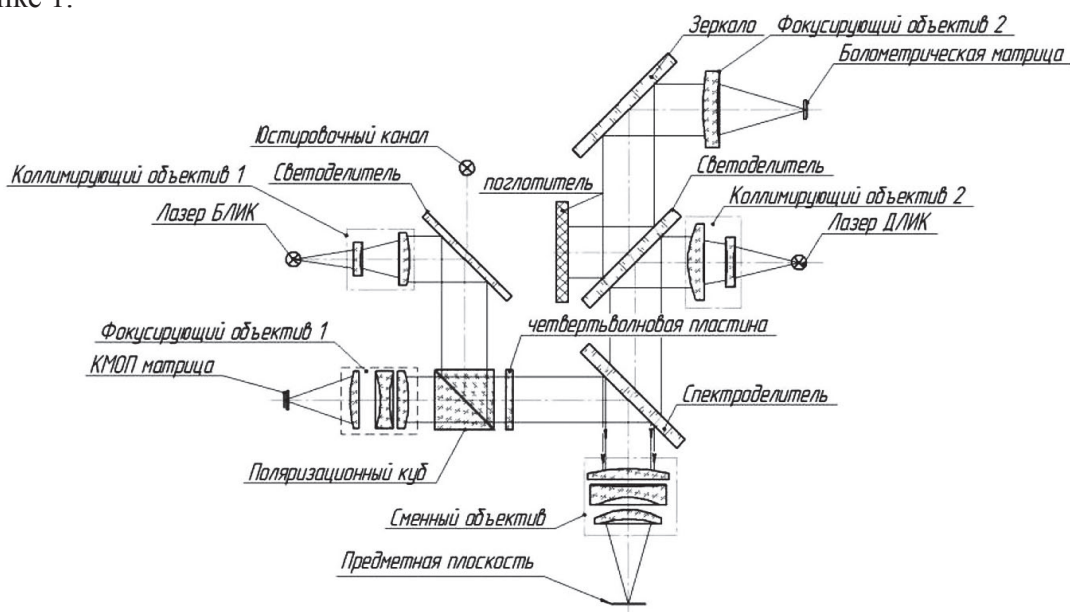


Рисунок 1. Лазерный Автоколлимационный Микроскоп. Схема оптическая

Принцип работы Лазерного Автоколлимационного Микроскопа основан на автоколлимационном методе измерения угловых значений величин. Прибор комплектуется набором фокусирующих объективов, позволяющих проводить линейные измерения. Лазерный Автоколлимационный Микроскоп включает в себя два измерительных канала и один юстировочный канал [3].

В первом измерительном канале излучение от лазерного модуля ДЛИК, пройдя коллимирующий объектив 2, попадает на светоделитель. Часть излучения, пройдя светоделитель, поглощается поглотителем излучения. Оставшаяся часть излучения отражается от светоделителя, проходит спектроделитель и направляется на контролируемую плоскую поверхность. Отраженное от контролируемой поверхности излучение проходит в обратном ходе спектроделитель, светоделитель и попадает на зеркало. Отразившись от зеркала, излучение попадает в фокусирующий объектив 2, который формирует изображение автоколлимационной точки на чувствительной поверхности болометрической матрицы.

Во втором измерительном канале излучение от лазерного модуля БЛИК проходит коллимирующий объектив 1, далее отражается от светоделителя и попадает на поляризационный куб. Отразившись от внутренней грани куба, излучение проходит четвертьволновую пластину, отражается от спектроделителя и направляется на контролируемую плоскую поверхность.

Отраженное от контролируемой поверхности излучение в обратном ходе отражается от спектроделителя, проходит через четвертьволновую пластину, поляризационный куб и попадает в фокусирующий объектив 1, который формирует автоколлимационное изображение на КМОП-матрице.

Юстировочный канал визуализирует общую оптическую ось устройства.

Если контролируемая поверхность перпендикулярна оптической оси Лазерного Автоколлимационного Микроскопа, то центр изображения автоколлимационной точки будет совпадать с центральным пикселем регистрирующей камеры Лазерного Автоколлимационного Микроскопа.

При наклоне исследуемой поверхности на угол  $\alpha$  относительно оптической оси Лазерного Автоколлимационного Микроскопа отраженные от нее лучи отклоняются на двойной угол  $2\alpha$  по отношению к первоначальному направлению и изображение на фоточувствительной поверхности регистрирующего фотоприемного устройства изменяет свое положение относительно центрального пикселя. Зная фокусное расстояние объектива регистрирующей камеры, по величине смещения изображения точки можно определить величину угла наклона  $\alpha$  исследуемой поверхности.

Для обеспечения возможности проведения линейных измерений, в частности измерения погрешности центрирования линз, Лазерный Автоколлимационный Микроскоп комплектуется набором сменных объективов. При проведении линейных измерений устанавливается один из сменных фокусирующих объективов.

По сравнению с современными средствами контроля погрешностей центрирования, такими как Trioptics OptiCentric, CS-100 и др., Лазерный Автоколлимационный Микроскоп обладает следующими преимуществами:

1. Расширенный спектральный диапазон без изменения конструкции или замены отдельных узлов и элементов – от видимой области спектра до длинноволнового ИК диапазона (до 14 мкм);

2. Малые габариты и вес;
3. Возможность установки на существующие центрировочные станки;
4. Высокая точность контроля погрешностей центрирования: до 1 мкм в видимом и ближнем ИК-диапазонах, до 5 мкм в средневолновом и длинноволновом ИК-диапазонах за счет алгоритмов обработки изображения;
5. Универсальность: возможность проведения как угловых, так и линейных измерений.

Благодаря своей оптической системе и используемым источникам излучения, разрабатываемый прибор будет являться универсальным средством контроля качества сборки оптических систем, работающих как в видимом, так и в ближнем, среднем и дальнем диапазонах инфракрасного излучения. Результаты измерений будут отображаться в удобной для оператора форме на экране обычного монитора.

#### **Список литературы:**

1. В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков, *Современные проблемы инфракрасной техники*, с.4-15, (2011).
2. Н. Н. Hopkins, H. J. Tiziani, *British Journal of Applied Physics*, 17, с.33-55, (1966).
3. А.В. Тарасишин, С.Н. Скляров, К.Г. Кушнарев, С.В. Мишин, *Лазерный автоколлимационный микроскоп*, Заявка на изобретение РФ №2015150927 от 27.11.2015 г.

## **СТАЦИОНАРНЫЕ И МОБИЛЬНЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ И ДАЛЬНОСТИ С ФОТОФИКСАЦИЕЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**Александрова Н.Г., Волобуев В.Г., Лицарев Н.А.,  
Михайлов С.С., Потапов А.К., Почгарев В.Л.**

АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха», г. Москва, Россия  
Инновационные проекты. Гражданская продукция: технологии,  
продукты, решения, услуги

Лазерные измерители скорости и дальности решают задачу однозначной автоматической идентификации транспортного средства, нарушившего скоростной режим. Автоматическая регистрация позволяет уменьшить уровень коррупционной составляющей.

#### **Введение**

Имеющиеся отечественные аналоги являются однополосными приборами радиолокационного типа, в которых для измерения скорости используется эффект Доплера. Особенностью радиолокационных датчиков является возможность неоднозначного трак-

тования результатов измерения при сильной заполненности трассы. У лазерных измерителей скорости неоднозначность измерений отсутствует. Многополосные датчики лазерного типа на данный момент отсутствуют.

### **Структурная схема**

Отличительной особенностью данных приборов является наличие узкой диаграммы направленности излучения, что позволяет в центре зафиксированного изображения ввести метку в виде прямоугольника, указывающего область лазерного облучения. Эта метка однозначно указывает ТС, дальность и скорость которого измеряется.

При наличии факта превышения ТС скорости движения, ТС будет фотографироваться. Данная фотография с параметрами движения будет записываться в память компьютера. Далее по каналу связи Ethernet данные фото будут пересылаться в ЦОИ. При таком построении скорость фиксации кадров с изображением ТС-нарушителя никак не связана с пропускной способностью линии связи – кадры будут передаваться по мере освобождения линии. В ЦОИ с полученными фотоизображениями можно будет осуществлять все необходимые операции: автоматическое распознавание ГРЗ, сверку с имеющейся базой данных, проверку на наличие угонов, выписку квитанций о штрафах.

Для оперативной оценки дорожной обстановки в месте установки данных приборов, предусматривается режим передачи текущего видеоизображения в ЦОИ.

Использование узконаправленного лазерного излучения в трехполосном датчике позволяет отдельно контролировать каждую полосу движения с фиксацией нарушения скоростного режима. Радарные измерители скорости принципиально не позволяют этого сделать на больших дальностях из-за широкой диаграммы направленности радиолуча, охватывающего все три полосы одновременно

### **Показатели качества**

Имеющиеся отечественные аналоги являются однополосными приборами радиолокационного типа, в которых для измерения скорости используется эффект Доплера. Многополосные датчики лазерного типа на данный момент отсутствуют.

Особенностью радиолокационных датчиков является возможность неоднозначного трактования результатов измерения при сильной заполненности трассы. У лазерных измерителей скорости неоднозначность измерений отсутствует.

### **Заключение**

Успешное выполнение данной работы решает задачу однозначной автоматической идентификации ТС, нарушившего скоростной режим. Автоматическая регистрация позволит уменьшить уровень коррупционной составляющей.

# ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ Ho:YLF ЛАЗЕРЫ, ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Наривончик А.С., Калининцева Н.А., Павлова А.Л.,  
Серебряков В.А.\*, Скворцов Д.В.

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

\*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Лазерная физика. Лазерная спектроскопия

Для накачки параметрического преобразователя излучения в  $6\div 8$  мкм диапазон (прецизионная хирургия) на кристалле ZGP разработан импульсно-периодический Ho:YLF лазер ( $\lambda=2,05$  мкм) с уникальными параметрами: энергия в импульсе до 80 мДж на частоте 100 Гц и 50 мДж на 1000 Гц, длительность импульса  $\sim 20$  нс,  $M^2\sim 1.5$ . Высокое качество пучка достигается благодаря использованию для накачки гольмия волоконного Tm лазера  $\lambda=1,94$  мкм (малые стоксовы потери). Оптимизация выполнена с учетом ограничения на лучевую прочность зеркал резонатора и Ho-кристаллов.

## Введение

Актуальность разработки лазеров «безопасного для глаз» диапазона длин волн (1,5-2,1 мкм), к которым относится двухмикронный Ho:YLF лазер, связана с многообразием сфер их применения [1]. Благодаря наличию в этом диапазоне линий поглощения на колебательных переходах молекул, 2 мкм лазерные системы используются для определения скорости ветра, концентрации углекислого газа и аэрозолей в атмосфере Земли. Малая глубина проникновения 2 мкм излучения в биоткань с одновременной коагуляцией сосудов (остановка кровотечения) востребованы в ряде областей медицины – преимущественно в малоинвазивной эндоскопической хирургии мягких тканей и дроблении конкрементов.

Еще одним применением 2 мкм лазеров является использование их в качестве источников накачки ИК параметрических генераторов света (ПГС) среднего ИК диапазона, в частности, на основе кристалла  $ZnGeP_2$  (ZGP), обладающего высокой нелинейностью в диапазоне 3-8 мкм (окна прозрачности атмосферы). ПГС ZGP используются в системах противодействия и для расширения возможностей экологического мониторинга (наличие дополнительных линий поглощения молекул, в т.ч. углеродсодержащих – метана, этилена, этана и угарного газа). ПГС ZGP предполагается использовать также в прецизионной хирургии – благодаря наличию пиков поглощения белков и холестерина эфиров в 6 мкм диапазоне [2].

В докладе представлены результаты разработки для прототипа клинического ПГС ZGP мощного импульсно-периодического Ho:YLF лазера накачки (порог ПГС абляции биоткани  $\sim 1$  Дж/см<sup>2</sup> и, соответственно, от 2 мкм лазера требуется энергия импульсов  $\geq 50$  мДж на оптимальных для микрохирургии частотах следования 100-1000 Гц).



## 1. Гольмиевые лазеры, проблемы и методы их решения

В качестве материала матрицы 2 мкм лазеров обычно используют кристаллы YAG и YLF, благодаря высоким спектроскопическим и термомеханическим свойствам, а ионом-акцептором является  $\text{Ho}^{3+}$ , обладающий большим временем жизни верхнего лазерного уровня ( $\tau \approx 8$  мс для YAG и  $\sim 15$  мс для YLF). Однако кристаллы, легированные ионами гольмия, не имеют интенсивных линий поглощения в диапазоне короче 1,9 мкм. Кристаллы, легированные дополнительно ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , обходят эту проблему, но обладают сильным эффектом апконверсии. Альтернативным подходом является прямая накачка гольмия лазером, легированным ионами тулия (например, волоконным Tm лазером). Преимущество данного метода в совокупности с малыми стоксовыми потерями ( $\sim 9\%$  для Ho:YAG и  $\sim 6\%$  для Ho:YLF), позволяет достичь высокого КПД 2 мкм генерации в непрерывном и квази-непрерывном режиме при высоком качестве пучка. Однако эффективность Ho-кристаллов в качестве активной среды определяется квази-трехуровневой (QTL) природой лазерного перехода. В моноимпульсном режиме при интенсивной накачке процесс перехода QTL иона со Штарковских компонент основного уровня на возбужденный сопровождается как апконверсией, так и истощением (просветлением) основного уровня (GSD). Поэтому моделирование импульсного режима, как правило, основано на решении скоростных уравнений с учетом переходных процессов GSD и UC.

Однако расчетные модели не объясняют ни наблюдаемое в частотном режиме «тушение» времени жизни возбужденного состояния (до  $\sim 2$  мс в Ho:YLF), ни рост КПД генерации с превышением интенсивности накачки над пороговой до 20х для Ho:YAG и до  $\sim 100$ х для Ho:YLF [3].

В настоящей работе, с целью оптимизации параметров и, в первую очередь, КПД Ho-лазера, разрабатываемого как источник накачки 6 мкм ПГС ZGP, проведено экспериментальное и численное моделирование Ho:YLF лазера при высоких интенсивностях накачки, но для более низких частот следования  $\leq 1000$  Гц и, соответственно, для более высокоэнергетических импульсов с учетом ограничений на лучевую прочность зеркал резонатора и YLF кристаллов.

## 2. Результаты экспериментальных исследований

**2.1 Оценка влияния UC на генерационные характеристики Ho:YLF лазера** проведена непосредственно на лазерной системе, используя аналитические зависимости поглощения и усиления Ho:YLF кристаллов от интенсивности накачки [4]. Ho:YLF кристалл (0,3 и 0,5%  $\text{Ho}^{3+}$ ) возбуждался на интенсивности накачки до 12 кВт/см<sup>2</sup>:

$$T = \exp\left(- (N_1 f_1 - N_2 f_2) \frac{\sigma_a}{f_1} \ell\right); \quad G = \exp\left(- (N_1 f_l - N_2 f_u) \frac{\sigma_e}{f_l} \ell\right)$$

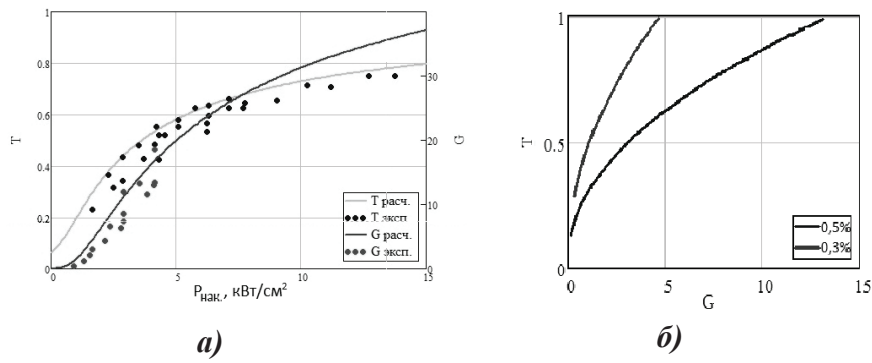
Результаты эксперимента и моделирования, рис. 1, хорошо согласуются в широком диапазоне плотностей мощности накачки, при том, что кристалл 0,3%  $\times$  5 см полностью просветляется уже при усилении  $G \sim 4$ , рис. 4б. Можно заключить, что апконверсия пренебрежима для данных параметров.

## 2.2 Разработка импульсно-периодического Ho:YLF лазера

Ho:YLF лазер был построен по схеме задающий генератор-усилитель, рис. 2 [5].

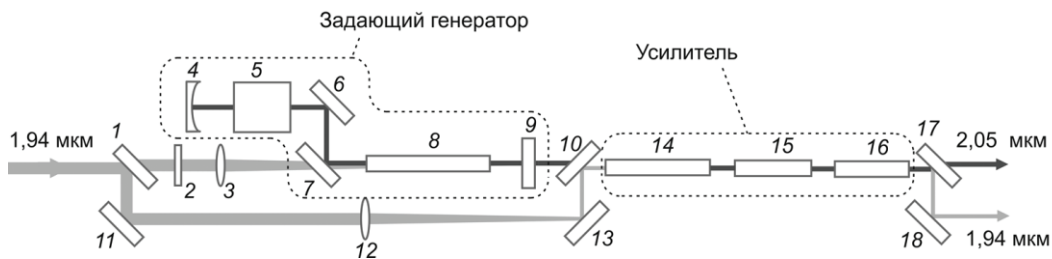
На выходе 3Г в моноимпульсном режиме ( $\lambda=2051$  нм) при мощности накачки 30 Вт получено 13 мДж (100 Гц) или 8 мДж (1000 Гц), (рис. 3), что соответствует оптической эффективности  $\sim 25\%$ ; расходимость  $M^2 \sim 1,3$ .





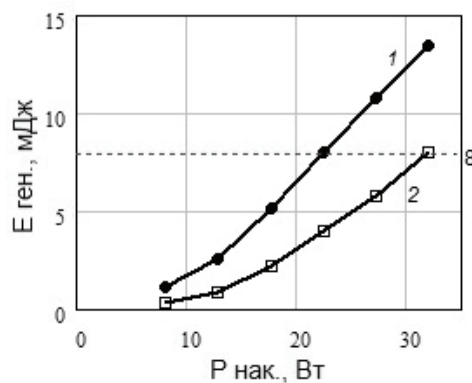
**Рисунок 1.**

- а)** Пропускание  $T$  и усиление  $G$  кристалла  $\text{Ho:YLF}$  ( $0,5\% \times 8 \text{ см}$ ) в зависимости от интенсивности накачки (кВт/см<sup>2</sup>);
- б)** Пропускание  $T$  (%) кристаллов  $\text{Ho:YLF}$  с концентрацией 0,3% и 0,5% и длиной 5 см в зависимости от усиления  $G$



**Рисунок 2.**

- Схема  $\text{Ho:YLF}$  лазера: 1 – поляризационный светоделитель; 2 – пластинка  $\lambda/2$ ; 3, 12 – фокусирующие линзы; 4 – «глухое» зеркало резонатора; 5 – АОМ; 6, 11, 13, 18 – зеркала 45°; 7, 10, 17 – дихроичные зеркала; 8, 14, 15, 16 –  $\text{Ho:YLF}$  активные элементы; 9 – выходное зеркало резонатора



**Рисунок 3.**

- Зависимость энергии ЗГ  $\text{Ho:YLF}$  лазера от мощности накачки (1 -100 Гц, 2 -1000 Гц). Пунктирная линия показывает энергию ЗГ, идущую на вход ПУ

На выходе Ho:YLF лазера при накачке усилителя  $\sim 70$  Вт и энергии ЗГ  $\sim 8$  мДж, (пунктирная линия на рис. 2) была получена энергия 80 мДж (ограничивается лучевой прочностью кристалла Ho:YLF) на частоте повторения импульсов 100 Гц и 50 мДж при накачке усилителя  $\sim 120$  Вт на частоте повторения 1000 Гц. Длительность импульсов составляла  $\sim 20$  нс. Качество выходного пучка Ho:YLF лазера близко к дифракционному ( $M^2 \approx 1,5$ ) и слабо зависело от частоты повторения импульсов. Эффективность съема энергии в усилителе на максимальной накачке достигала  $\sim 45\%$  при оптическом КПД лазера  $\sim 11\%$  на частоте 100 Гц и  $\sim 30\%$  на частоте 1000 Гц (сравнимо с [3]).

### **Заключение**

Проведена оптимизация Ho:YLF лазера ( $\lambda = 2,051$  мкм для эффективной накачки ПГС ZGP), получена энергия 80/50 мДж при частоте следования импульсов 100/1000 Гц (длительность импульса  $\sim 20$  нс,  $M^2 \approx 1,5$ ).

### **Список литературы:**

1. K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann, P. Fuhrberg. 2  $\mu\text{m}$  Laser Sources and Their Possible Applications. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. ISBN 978-953-7619-82-4, 2010.
2. Mid-infrared solid-state laser systems for minimally invasive surgery // Final Project Report, Project MIRSURG, Grant Agreement number: 224042. Project's coordinator Dr. V. Petrov. Berlin, 2012. 77 p.
3. W. Koen, C. Jacobs, L. Wu, H. J. Strauss. 60W Ho:YLF oscillator-amplifier system. *Proc. SPIE Vol. 9342, 93421Y-1*, 2015
4. A.F. Kornev, A.S. Narivonchik, A.L. Pavlova, V.A. Serebryakov. Efficient 50 J/1000 Hz Q-switched Ho:YLF MOPA laser. *Laser Optics 2012, Conf. Digest (OSA)*, paper ThR1, 2012
5. V.A. Serebryakov, É.V. Boïko, A.G. Kalintsev, A.F. Kornev, A.S. Narivonchik, A.L. Pavlova. Mid-IR laser for high-precision surgery // *J. Optical Technology*. 2015. Vol. 82(12). P. 781-788. *Оптический журнал*, 82, №12, 2015

## **Q-SWITCHED PULSED HO:YLF LASERS, THE OPTIMIZATION PROBLEM**

# ВНЕДРЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕФТЕРАЗЛИВОВ В АКВАТОРИИ РЕКИ НЕВА

**Журенков А.Г., Яковлев В.А.**

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
Оптика природных сред и экология

В докладе рассматривается опыт внедрения инновационных оптических технологий контроля экологического состояния водных объектов на примере оптической системы контроля аварийных нефтеразливов в акватории реки Нева.

## **Введение**

Аварийные разливы нефтепродуктов (по некоторым оценкам до 5% добытой в мире нефти теряется при её транспортировке) являются одной из серьезнейших экологических проблем нашего времени.

Между тем используемые на практике методы и средства обнаружения разливов нефтепродуктов не отвечают запросам времени, технически устарели и требуют существенного развития. Авторы в последние годы активно занимаются разработкой наиболее наукоемких информационно-оптических технологий обнаружения нефтепродуктов. Необходимость в их создании возникла в связи с увеличением числа аварийных разливов, вызванного резким ростом транспортировки нефтепродуктов по водной системе Ладога – р. Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива. Последствия аварийного разлива на Ладоге, р. Нева или Невской губе могут нанести непоправимый ущерб культурно-исторической части Санкт-Петербурга, поставить под угрозу водоснабжение мегаполиса, а разлив в Восточной части Финского залива чреват загрязнением финляндской части акватории Финского залива. Поэтому создание системы раннего обнаружения аварийных разливов нефтепродуктов на акватории указанной водной системы является чрезвычайно важной задачей.

Надо сказать, что подобные проблемы загрязнения водных объектов нефтепродуктами встречаются и во многих других регионах России и странах мира. Поэтому очевидны перспективность информационно-оптических технологий обнаружения нефтепродуктов и необходимость их широкого внедрения в практику борьбы с аварийными разливами. С учётом значимости решаемых задач экологического контроля, специалистами АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» выполнен цикл работ по внедрению оптико-электронных комплексов для предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с аварийными разливами нефтепродуктов на акватории р. Нева.

Внедрение в практику той или иной технологии невозможно без привязки к конкретным условиям её эксплуатации. Поэтому в настоящем докладе рассматривается использование технологий контроля экологического состояния водных объектов в рамках комплексного плана операций по обнаружению и ликвидации аварийных разливов нефтепродуктов на акватории в городской черте Санкт-Петербурга, разработанного по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Администрации Санкт-Петербурга. Под технологией здесь

понимаются оптические методы и средства контроля разливов нефтепродуктов на водной поверхности и система передачи многомерной оптической информации по мобильной связи в центр управления по ликвидации аварийных разливов.

### **Описание системы**

При создании автоматизированной системы контроля была использована инновационная технология регистрации нефтяных пленок на водной поверхности оптическими датчиками - лидарами [1,2]. Зондирование осуществлялось в надир совмещенными лучами двух полупроводниковых лазерных диодов, генерирующих излучение на разных длинах волн (в диапазонах 0,6 мкм и 0,9 мкм).

Сигналами датчика являются интенсивности отраженного излучения на двух используемых длинах волн. Разделение сигналов при обработке производится благодаря модуляции зондирующего излучения на разных частотах (для каждой из длин волн).

При наличии на поверхности тонкой нефтяной пленки (толщиной до 10...20 мкм) соотношение между сигналами меняется в зависимости от ее толщины вследствие явления интерференции, происходящей на каждой из длин волн. В результате возрастает дисперсия отношений сигналов на двух длинах волн. Это используется для регистрации нефтяных загрязнений на водной поверхности. Применение двух длин волн также позволяет существенно подавить влияние ветрового волнения на работу прибора. Это важно, так как оно слабо гасится тонкими пленками.

Если на поверхности лежит толстая нефтяная пленка, то явления интерференции вследствие сильного поглощения света не возникает. В этом случае для обнаружения пленок используется различие коэффициентов отражения света нефтью и водой (на рабочих длинах волн коэффициент отражения света от нефти в два раза больше). Работа ведется с одним каналом прибора. Так как толстые пленки выглаживают водную поверхность, реализуется возможность подавления влияния волнения путем оптимизации оптической системы одноканального прибора (благодаря применению узкого луча и большой приемной апертуры).

### **Результаты внедрения (I)**

Значительные трудности при локализации и сборе аварийных разливов нефтепродуктов в Санкт-Петербурге связаны в первую очередь с высокой мощностью потока и скоростью течения р. Нева. Поэтому особое значение для повышения эффективности мероприятий по ликвидации нефтяных разливов и предотвращения загрязнения имеет сокращение времени подхода судов «первого броска» к месту разлива и начала работ по локализации нефтяного пятна. Это в свою очередь требует создания системы обнаружения нефтяных загрязнений на р. Нева, представляющей собой разветвленную сеть датчиков, размещенных в зонах повышенного риска и своевременно реагирующих как на небольшие выбросы нефтепродуктов (фоновые условия), так и на аварийные. Вся регистрируемая оптическими датчиками информация после селекции и предварительной обработки (в реальном масштабе времени) передаётся в центр управления для её обобщения и анализа в целях принятия правильных управленческих решений [2,3].

Первая очередь автоматизированной системы раннего обнаружения нефтеразливов на р. Нева включала два типа оптических регистраторов – два регистратора лазерного типа на мосту Володарского и два регистратора светодиодного типа на остальных мостах. Это позволило в условиях оперативного их использования провести сравнение эффективности работы двух типов регистраторов нефтяной пленки и выработать предложения по дальнейшему развитию оптической аппаратуры.

Следует заметить что, применение только активных (использующих зондирующее излучение) оптических методов обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности не может в полной мере решать поставленную задачу. Это связано с рядом обстоятельств. В первую очередь относительно часто реализуются неблагоприятные для указанных выше методов гидрометеорологические условия (в частности, туман, интенсивные осадки и т.п.). И наоборот, в солнечную и ветреную погоду помехозащищенность датчиков в видимой части спектра снижается.

В качестве одного из путей выхода из создавшейся ситуации в современных информационно-оптических технологиях рекомендуется дополнительное использование пассивных (без источника зондирующего излучения) ИК-систем. Известно, что формирование сигналов оптических систем наблюдения водной поверхности в ИК и видимом диапазонах спектра основано на различных физических механизмах, имеют разные как помехи, так и неблагоприятные гидрометеорологические условия эксплуатации и поэтому дополняют друг друга, значительно повышая информационные возможности комплексной системы в целом.

### **Результаты внедрения (II)**

В Ленинградской области на Кузьминском железнодорожном мосту через Неву размещен, созданный при непосредственном участии АО «ГОИ им. С.И. Вавилова», комплекс оптико-электронной аппаратуры для обнаружения нефтяных загрязнений в акватории р. Нева с целью оперативного реагирования и предотвращения попадания залповых выбросов нефтепродуктов в городские водозаборы и для обеспечения бесперебойного водоснабжения города Санкт-Петербурга и пригородов [4].

Кузьминский железнодорожный мост в системе «Ладога – р. Нева – Невская губа – восточная часть Финского залива» находится примерно посередине между истоком реки Нева – Ладожским озером – и той частью реки, где начинается территория Колпинского района Санкт-Петербурга. При обнаружении аварийного разлива нефтепродуктов имеется достаточно времени (порядка 4-х часов) для принятия соответствующих мер по предотвращению попадания нефтепродуктов в водозаборные сооружения водопроводной станции г. Колпино.

### **Заключение**

Опыт работы с уже существующей системой оптических датчиков, установленных на мостах через р. Нева, дает основание полагать, что рациональное размещение таких приборов в комплексе с оптическими флюориметрическими датчиками проточного типа, располагаемых в стационарных местах выпуска сточных вод (канализационные сети ГУП «Водоканал», сточные воды крупных городских предприятий и организаций, куда часто попадают нефтепродукты) позволят создать надежную систему непрерывного контроля и раннего оповещения об аварийных разливах нефтепродуктов с целью оперативного принятия оптимальных управленческих решений по их локализации и ликвидации.

### **Список литературы:**

1. А.З. Зурабян, А.С. Тиболов, В.А. Яковлев, А.Г. Журенков, Корабельный оптический индикатор нефтяных загрязнений водной поверхности, *Оптический журнал*, **64**, №8, с. 87-89, (1997).
2. А.З. Зурабян, И.Д. Гольдин, В.А. Яковлев, Использование современных информационно-оптических технологий в задачах обнаружения и идентификации нефтяных разливов. Сб. «*Экологическая безопасность С.-Петербурга*», с.65-72, (2002).

3. В.А. Румянцев, В.А. Яковлев, А.З. Зурабян, А.Г. Журенков, Оптические методы и средства контроля разливов нефтепродуктов на водной поверхности. Под редакцией академика РАН Г.В. Смирнова. Изд. ЛЕМА, СПб. 2007. 32 с.

4. А.Г. Журенков, В.А. Румянцев, В.А. Яковлев, Е.Д. Нефедова, А.А. Зайчук, Комплекс оборудования по обнаружению аварийных разливов нефтепродуктов в акватории р. Нева, *Водоснабжение и санитарная техника*, №6. с. 28-33, (2012).

## **INTRODUCTION OF OPTICAL TECHNOLOGY TO DETECT OIL SPILLS IN THE NEVA RIVER**

**Zhurenkov A.G., Yakovlev V.A.**

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

The report examines the experience of the introduction of innovative optical technologies control of water ecological status on example of optical system of accidental oil spills control in the Neva River.

## **ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ ПОДВОДНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

**Журенков А.Г., Яковлев В.А.**

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
Оптика природных сред и экология

В докладе представлена инновационная разработка АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» - оптико-акустический комплекс для дистанционного обнаружения и пеленгации повреждений на морских подводных трубопроводах.

### **Введение**

В целях обеспечения функционирования топливно-энергетического комплекса в России и за рубежом осуществляются многочисленные программы прокладки подводных трубопроводных систем углеводородов (ПТСУ) и создания морской и береговой инфраструктуры. Текущее обслуживание таких систем требует мониторинга ПТСУ, который включает: наблюдение за трассой трубопроводов; обследование его технического состояния; обнаружение участков, требующих принятия срочных мер; определение мест утечки углеводородов. Для решения последней задачи особо большое значение имеет возможность реализации дистанционных методов. Это особенно необходимо в труднодоступных или недоступных техническому надзору районах прокладки напорных трубопроводов, в частности, в подводных трубопроводах и дюкерах. Основным неконтактным методом обнаружения места течи в настоящее время является акустический метод, имеющий ряд существенных недостатков [1,2].



Анализ функциональных задач обнаружителей утечек продукта из подводных трубопроводов различного назначения показывает, что в основу построения дистанционных обнаружителей могут быть положены оптико-акустические принципы обнаружения шумоизлучающих струй [3]. Основной проблемой применения данного класса приборов при решении задач обнаружения и локации источников гидроакустических колебаний является оптимизация его характеристик по параметрам регистрируемого сигнала, шумов и, прежде всего, по точности определения направления на источник.

В настоящее время не существует устройств подобного типа для решения задачи дистанционного обнаружения аварийных разрывов в подводных трубопроводах и пригодных для оборудования автоматических погружаемых (в т. ч. глубоководных) аппаратов, используемых для поиска и ремонта поврежденных участков трубопроводов.

Традиционные акустические приемники не способны обеспечить требуемое сочетание высокой чувствительности и узкой диаграммы направленности в заданных массогабаритах.

В ГОИ им. С.И. Вавилова был разработан малогабаритный оптико-электронный регистратор флуктуаций показателя преломления, позволяющий дистанционно (без использования двухпозиционной локации) идентифицировать источники звука связанные с утечками газа из небольших повреждений (отверстий) в подводных трубопроводах и определять направление на их источники. В результате бассейновой апробации данного устройства было установлено, что его чувствительность не уступает чувствительности современных гидрофонов и в дальнейшем может быть улучшена.

Сотрудниками ГОИ разработаны современные технологии раздельного определения флуктуаций оптических параметров морской среды, обусловленных наличием взвеси, акустических (звуковых) колебаний и турбулентности. С одной стороны, чувствительность, разрешение и иные важные параметры измерения обеспечивают реализацию контроля состояния среды оптическими средствами на уровне шумов моря, а с другой — они более компактны и универсальны по сравнению с акустическими средствами [4-6].

### Показатели качества и состав аппаратуры

Предлагаемый АО «ГОИ им. С.И. Вавилова» к внедрению комплекс обеспечит мониторинг акваторий в районах добычи и транспортировки углеводородного сырья, контроль состояния трубопроводов, дистанционное обнаружение мест утечек (в том числе, малых утечек, без заметного падения давления в трубопроводе), автоматическое наведение подводного аппарата на место утечки (рис. 1), экологический контроль акватории, дистанционный экспресс-анализ компонентов биосферы, разведку месторождений углеводородов в шельфовой зоне.

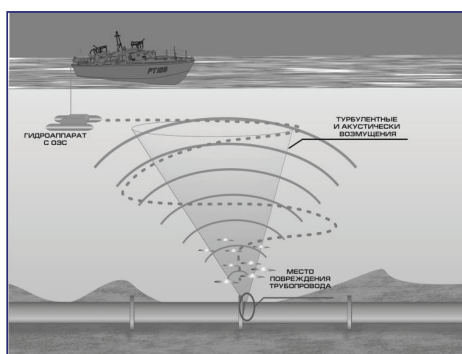


Рисунок 1.

Оптико-акустический комплекс для дистанционного мониторинга подводных трубопроводов

Состав комплекса:

- система обнаружения места утечки нефтепродуктов из трубопровода;
- флуоресцентный регистратор нефтяных пленок;
- авиационный и корабельный сканирующие ИК-радиометры.

Состав может изменяться в зависимости от характера решаемой задачи.

### Заключение

Разрабатываемая технология может найти широкое применения в задачах дистанционного обнаружения дефектов в подводных трубопроводах и наведения подводных управляемых аппаратов на поврежденный участок. Потребителями разрабатываемого оптико-акустического комплекса обнаружения и пеленгации повреждений на морских подводных трубопроводах являются отечественные и зарубежные компании, создающие и обслуживающие морские трубопроводные системы, в том числе создаваемые в ходе освоения арктического континентального шельфа.

### Список литературы:

1. Б.И. Лапшин. Акустический метод поиска дефектов на подводных трубопроводах. *Строительство трубопроводов*, №2, с. 28-30. (1984)
2. Р.Ц. Гулиянц, А.А. Комарицин, Ю.А. Корякин, Ю.Ф. Тарасюк, А.А. Хребтов. *Концепция мониторинга подводной транспортной системы углеводородов*. Морской вестник, **1(9)**, с. 73, (2004).
3. А.Г. Мунин, М.А. Щепочкин. Спектр звуковой мощности дозвуковой струи. *Акустический журнал*. **XVIII**, вып. 2, с. 282-299, (1972).
4. А.Г. Журенков, В.А. Яковлев. *Обнаружение гидроакустических волн теньевыми приборами на фоне турбулентности и взвеси*. Оптический журнал, **71**, №4, с. 28 -33. (2004).
5. С.П. Буданов, Э.Г. Гончаров, Б.М. Мартинсон, А.Г. Журенков, В.А. Яковлев. *Диаграмма направленности гидрооптического приемника акустических колебаний*. Оптический журнал, **71**, №4, с. 34 -38, (2004)
6. В.А. Яковлев. *Прямые и обратные задачи в гидрооптике*. Теоретические аспекты. Изд. РГГМУ, СПб. 2004. 127 с.

## OPTICAL-ACOUSTIC SYSTEM LEAK DETECTION FROM UNDERWATER OIL AND GAS PIPELINES

**Zhurenkov A.G., Yakovlev V.A.**

AS.I. Vavilov State Optical Institute, Saint-Petersburg, Russia

The report presents an innovative development of S.I. Vavilov State Optical Institute - opto-acoustic system for remote detection and direction finding of damage to subsea pipelines.

# ОКСИДНЫЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ НАНОМЕТКИ В СФЕРЕ МЕДИЦИНЫ И СИСТЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ

Мамонова Д.В., Гольева Е.В., Колесников И.Е.\*, Михайлов М.Д.

АО «Научно-исследовательский и технологический институт оптического  
материаловедения ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

\*Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия

Синтез наночастиц и люминесцентная спектроскопия

Разработаны эффективные методы синтеза, позволяющие получать отдельные оксидные наночастицы размером от 40 до 200 нм, легированные ионами редкоземельных металлов. В работе получен ряд нанолюминофоров различного состава перспективных для создания биофункциональных меток и защиты от подделки.

На рубеже новых технологий большим толчком к развитию стало создание наноструктурных объектов. Уже сейчас можно наблюдать первые шаги на пути реализации наноразмерных меток в системах безопасности или медицине. Для систем безопасности ключевым фактором является возможность скрыть присутствие датчиков. Именно поэтому нанотехнологии являются приоритетным методом в создании систем контроля доступа и идентификации подлинности. Основная масса разработок представляет собой интерпретации нанорисунков, содержащих различные текстуры и рельеф. Информацию о подлинности продукта или документа можно внести в одну квантовую точку, что упростит идентификацию и сделает невозможным создание подделки.

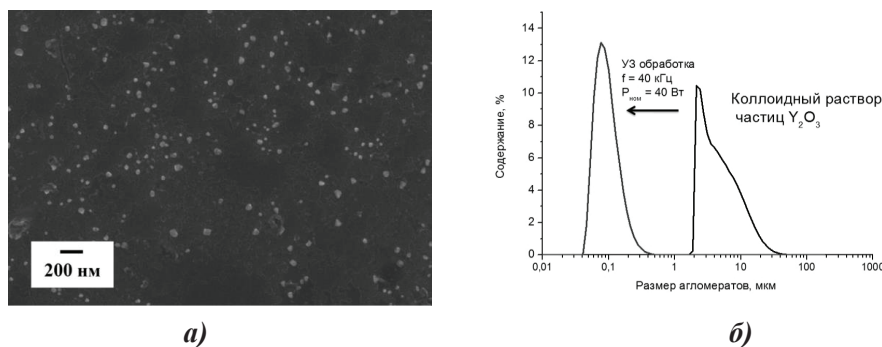
Медицина особенно нуждается в тех возможностях, которые могут предоставить наноразмерные метки: диагностика заболеваний на ранних стадиях; адресная доставка лекарств; регенеративная медицина. Независимо от использования (*in vivo/in vitro*) имеется тенденция в сторону уменьшения количества наноматериала, внедряемого в процесс. Для этого нанобъектам необходимо присвоить высокую чувствительность к управлению и идентификации.

Для решения этих задач подходят оксидные нанолюминофоры. Нами разработаны две методики синтеза оксидных наночастиц, отличающиеся высокой эффективностью, дешевизной, а также возможностью легирования каждой частицы ионами редкоземельных металлов. Оба метода базируются на методе Печини [1].

Первый метод разработан для синтеза частиц таких сложных оксидов, как  $Y_3Al_5O_{12}$ ,  $YVO_4$  и  $MgAl_2O_4$ . Процесс проводится с использованием дополнительной термической обработки в солевом расплаве сульфата натрия или хлорида калия. В процессе прокаливания в солевом расплаве структура агломерата претерпевает изменения: с одной стороны – уменьшение в размерах за счет отделения частиц с поверхности, с другой – увеличение размера частиц за счет перекристаллизации или уменьшение пористости. Жидкая среда заполняет поры, препятствуя дальнейшему спеканию и агломерации при прокаливании.

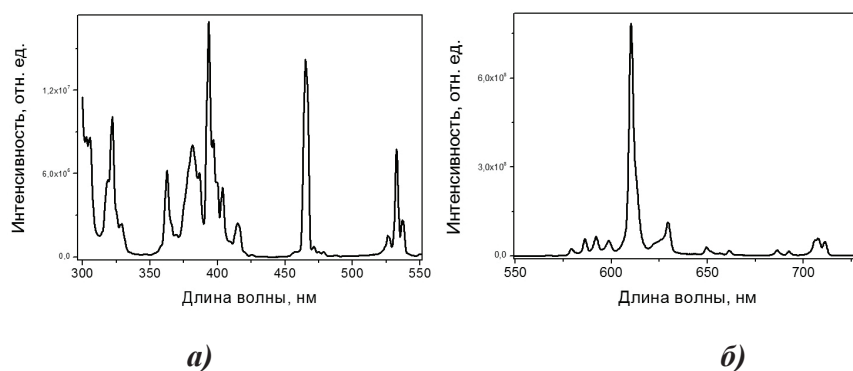
вании и растворяя границы между уже сформированными частицами. Данная методика позволяет получать отдельные частицы размером около 200 нм с выраженными люминесцентными свойствами [2-4]. Такие частицы легко обнаружить в биологической ткани, например, препарате крови [5].

Второй метод разработан для синтеза простых оксидов, например,  $Y_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$  или  $Gd_2O_3$ . Для образования отдельных частиц размером от 40 до 200 нм (рис. 1) в процессе синтеза обеспечивается интенсивное газовыделение, препятствующее спеканию и агломерации. С этой целью в методе Печини в систему вводится компонент-вспениватель, который будет равномерно распределен по полимеру и в процессе пиролиза выделять газообразное вещество. Для синтеза оксида иттрия в качестве такого компонента была выбрана смесь из нитрата алюминия и хлорида калия. Данная методика также позволяет легировать каждую частицу ионами редкоземельных металлов, что и позволяет использовать их как люминофор (рис. 2). Не зависимо от количества используемых частиц, возможна их идентификация на любых поверхностях и в приповерхностном слое биоматериала. Подобные свойства позволяют заложить необходимую информацию в каждую частицу и использовать ее для защиты от подделок.



**Рисунок 1.**

Частицы  $Y_2O_3:Eu$ , синтезированные методом «вспенивания» при температуре  $1000^\circ C$ :  
а) микрофотография, б) распределение частиц по размерам



**Рисунок 2.**

Спектры возбуждения

а) люминесценции б) образцов  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  (12%), синтезированных методом «вспенивания»

Аналогами нанокристаллических люминесцентных меток являются органические хромофоры и квантовые точки. Спектральные области возбуждения и люминесценции хромофоров и биологических тканей совпадают, поэтому использование их в медицинских целях оказывается затруднительным. Главным же недостатком люминесцентных

меток на основе органических хромофоров является их быстрая деградация под действием возбуждающего УФ излучения, в результате которой сигнал люминесценции исчезает. Фотостабильность меток на основе органических хромофоров не превышает нескольких минут. В стадии разработки для применения в медицине и биологии находятся иммобилизованные метки на основе квантовых точек размером от 2 до 50 нм с защитной оболочкой. Основными недостатками является высокая токсичность, поскольку их ядро состоит из соединений кадмия, селена и теллура и явление мерцания. Высокая токсичность предопределяет проблемы, как при массовом синтезе квантовых точек, так и при их использовании и последующей утилизации отходов. Люминесцентные метки на основе оксидных нанокристаллических частиц, легированные редкоземельными металлами позволят избавиться от упомянутых негативных эффектов, присущих органическим хромофорам и квантовым точкам.

Приведенные результаты позволяют утверждать, что полученные разработанными методиками люминофоры являются конкурентоспособными нанообъектами для разработок в области медицины и системах безопасности.

#### Список литературы:

1. Maggio P. Pechini, Method of Preparing Lead and Alkaline Earth Titanates and Niobates and Coating Method Using the Same to Form a Capacitor, United States Patent 3,330,697. July 11, (1967)
2. I.E. Kolesnikov, D.V. Tolstikova, A.V. Kurochkin, A.A. Manshina.  $\text{Eu}^{3+}$  concentration effect on luminescence properties of  $\text{YAG}:\text{Eu}^{3+}$  nanoparticles, *Optical Materials* 37 (2014) 306–310
3. I.E. Kolesnikov, D.V. Tolstikova, A.V. Kurochkin, S.A. Pulkin, A.A. Manshina, M.D. Mikhailov Concentration effect on photoluminescence of  $\text{Eu}^{3+}$ -doped nanocrystalline  $\text{YVO}_4$  // *Journal of Luminescence* 158 (2015) 469 – 474
4. I.E. Kolesnikov, E.V. Golyeva, A.V. Kurochkin, M.D. Mikhailov, Structural and luminescence properties of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}$  nanopowders, *Journal of Alloys and Compounds*, 654, (2016), 32-38
5. I.E. Kolesnikov, A.V. Povolotskiy, D.V. Tolstikova, , A.A. Manshina, M.D. Mikhailov Luminescence of  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Eu}^{3+}$  nanophosphors in blood and organic media, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48 (2015) 075401 (6pp) Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Соглашения № 14.604.21.0078 (RFMEFI60414X0078)

### OXIDE FLUORESCENT MARKERS FOR MEDICINE AND SECURITY APPLICATIONS

**Mamonova D.V., Golyeva E.V., Kolesnikov I.E.\*, Mikhailov M.D.**

Scientific and Technological Institute of Optical Material Science,  
VNTs S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, Russia

\* Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

Effective methods allowing preparing separate oxide nanoparticles doped with rare earth ions were developed. The particles size varies from 40 to 200 nm. A number of obtained nanophosphors are promising as biofunctional labels and in anti-counterfeiting area.



# ОПТИЧЕСКАЯ НАНОКЕРАМИКА ИЗ АЛЮМОМАГНИЕВОЙ ШПИНЕЛИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ БРОНИ И ИСКУССТВЕННЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

Гольева Е.В., Мамонова Д.В.\*, Михайлов М.Д.,  
Дунаев А.А., Игнатенков Б.А.

НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия  
\*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
Оптическое материаловедение и индустрия наносистем

Рассматривается инновационный продукт – оптическая нанокерамика на основе  $MgAl_2O_4$ , являющаяся перспективным материалом для создания брони, а также искусственных драгоценных камней с характеристиками, полностью имитирующими свойства их природных аналогов. Разработаны методики синтеза исходных нанопорошков, получены и исследованы высокоплотные керамические образцы.

## Введение

В настоящее время перед наукой остро стоят задачи решения проблем национальной безопасности, к числу которых относятся поиск и разработка новых высокоэффективных защитных материалов и структур. В связи с развитием технологий мощных видов оружия и средств поражения требуется совершенствование уже существующих и создание новых видов бронематериалов, причем наряду с их баллистическими свойствами критическим параметром выступает масса готового изделия, уменьшение которой при сохранении всех прочих характеристик ставится в приоритет. Для решения обозначенной проблемы наиболее перспективной является оптическая керамика алюмомагниево-шпинели (АМШ,  $MgAl_2O_4$ ), которая относится к классу прозрачной брони. АМШ обладает комплексом всех необходимых физико-химических и функциональных свойств, позволяющих рассматривать ее как эффективную броню для оптико-электронных систем, военной и гражданской техники, средств индивидуальной защиты. Она может также применяться для защиты входных люков летательных аппаратов, ракет, лазеров высоких энергий, экранов часов, телевизоров; защитных покрытий в системах ночного видения, высокотемпературных смотровых окнах; в качестве прозрачных окон для УФ литографии [1,2]. Преимущества керамической брони по сравнению со стеклом позволяют уменьшить вес брони и одновременно ее толщину более чем в два раза. С развитием нанотехнологий особенно актуально получение нанокерамики, для которой характерны повышенная прочность и твердость, обусловленные увеличением площади межзеренных границ, являющихся препятствием для движения дислокаций.

Помимо указанных особенностей применения АМШ в качестве прозрачной брони, разрабатываемая нами керамика может использоваться и для создания инновационной продукции гражданского назначения – искусственных драгоценных камней.



## Структурная схема

Нами разработана лабораторная технология оптической нанокерамики из АМШ, которая включает в себя следующие стадии: синтез исходных нанокристаллических порошков методами «мягкой химии», их консолидацию горячим одноосным прессованием/спеканием с последующей механической обработкой [3,4]. Для достижения улучшенных характеристик керамического материала (повышенной твердости, трещиностойкости, а также высокого светопропускания) при заданном фазовом составе необходимо получать высокооднородную высокоплотную керамику с нанокристаллической структурой, что в значительной степени зависит от свойств исходных порошков. Особое внимание уделяется степени их агломерации. Наличие крупных жестких агломератов в исходных порошках, не поддающихся разрушению никакими диспергационными способами, впоследствии приводит к образованию внутри- и межкристаллитных пор в образце, которые являются источниками рассеяния, а также начальными точками растрескивания материала. В связи с указанной проблемой нами была разработана методика синтеза нанопорошков, основанная на методе Печини (разновидность золь-гель синтеза), но с использованием дополнительной термообработки в солевом расплаве, за счет которой частицы остаются равномерно распределенными в течение всего синтеза. В результате такой модификации удастся избежать процессов сильной агломерации. Помимо описанной методики, нами также использовались порошки, синтезированные методом гидролиза двойного изопропилата Mg-Al (исходным сырьем была смесь гидроксидов Mg-Al, изготовленная в ООО «НН Оптика»).

Для консолидации порошковых материалов применялись два способа: горячее одноосное прессование и вакуумное спекание. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании первого варианта. Для исследований характеристик полученных образцов был задействован комплекс физико-химических методов анализа с использованием современного оборудования, в частности, были измерены плотность поликристаллических заготовок, получены и проанализированы спектры пропускания, исследованы их фазовый состав, микроструктура и микротвердость.

На рисунке 1 представлены спектр пропускания и фотография одного из образцов, изготовленного при оптимальных условиях синтеза исходных нанопорошков.

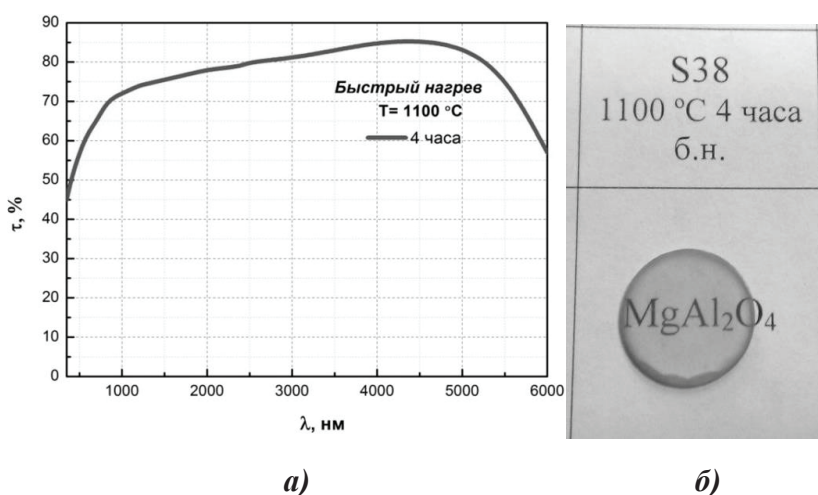


Рисунок 1.

- а) спектр пропускания  
б) фотография керамического образца АМШ, полученного при оптимальных условиях синтеза исходных порошков

Для получения цветных (окрашенных) керамических образцов, которые служат подходящей заменой искусственных драгоценных камней, исходные нанопорошки легировались примесными ионами, отвечающими за характерное окрашивание, в частности, были использованы ионы кобальта и никеля.

#### **Показатели качества**

По своим оптическим и физико-механическим свойствам АМШ имеет сходства с лейкосапфиром и оксинитридом алюминия (ALON), но обладает рядом преимуществ. По сравнению с лейкосапфиром АМШ более технологична, шлифовка и полировка этого материала требует гораздо меньше усилий и затрат, а изделия из АМШ могут быть больше по размеру и иметь более сложные формы. АМШ имеет бронестойкость в 1.6 раза выше, чем у стали, более устойчива к воздействию агрессивных сред по сравнению с силикатными стеклами, включая кварцевое, соответственно, может эксплуатироваться в жестких экстремальных условиях. Она также обладает большей областью прозрачности, чем ALON и лейкосапфир, следовательно, представляет большой интерес для создания мультиспектрального материала широкого назначения.

Второе применение разрабатываемой продукции – искусственные драгоценные камни. Существующие на сегодняшний день аналоги представляют собой искусственные камни в виде монокристаллов, получаемые традиционными методами (Чохральского, Вернейля и др.), которые характеризуются большой продолжительностью (от недель до месяцев), высокими температурами, технологическими сложностями и, как следствие, большими энергетическими затратами и высокой себестоимостью конечного продукта. В предлагаемом нами подходе рассматривается значительно более быстрый и экономически эффективный способ получения искусственных камней, использующий технологию, аналогичную разработанной для получения оптической керамики. Процесс получения керамики является групповым – одновременно могут выполняться все стадии процесса. Основными преимуществами разрабатываемой технологии производства искусственных драгоценных камней из оптической керамики по сравнению с технологией монокристаллов являются более широкая цветовая гамма образцов, возможность получения цветовых эффектов, обусловленных переменной по образцу концентрацией активатора.

#### **Заключение**

В результате проведенных исследований была разработана лабораторная технология оптической высокоплотной нанокерамики АМШ, представляющей значительный интерес для военного и гражданского применения. С одной стороны, данная продукция представляет несомненный интерес для задач локального и индивидуального бронирования, а с другой стороны, является перспективной заменой существующих искусственных драгоценных камней. Представленная технология отличается универсальностью, поскольку может быть легко адаптирована для получения керамических образцов другого состава, в частности, алюмоиттриевого граната, оксида иттрия и др. Она легко масштабируется, не требует сложного дорогостоящего оборудования, за исключением установки горячего изостатического прессования, а также позволяет получать высокоплотные однородные образцы с высоким пропусканием в видимой и ИК областях спектра.

Измерения характеристик образцов проведены с использованием оборудования ресурсных центров СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Инновационные технологии композитных материалов», а также кафедры «Физико-химия и технологии микросистемной техники» СПбПУ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК».

#### Список литературы:

1. W. Kim et al., *Applied optics*, **54**, №.31, pp.F210-F221, (2015).
2. I. Ganesh, *International Materials Reviews*, **58**, №.2, с.63-112, (2013).
3. Д.В. Толстикова, Е.В. Гольева, В.С. Лебанин, М.Д. Михайлов, А.А. Дунаев, В.Н. Ветров, Б.А. Игнатенков, *Оптический журнал*, **81**, №12, с.69-73, (2014).
4. Е.В. Гольева, М.Д. Михайлов, А.А. Дунаев, Б.А. Игнатенков, *Оптический журнал*, **83**, №2, с.67-72, (2016).

## ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ КОЛЛИМАТОРНЫЙ ПРИЦЕЛ С ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ЭЛЕМЕНТОМ

Корешев С.Н., Шевцов М.К.

АО «Государственный оптический институт  
им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия

Возможность использования голограммных оптических элементов для формирования мнимых изображений удаленных на «бесконечность» прицельных марок рассматривалась многими исследователями с начала 70 годов прошлого века. Основные преимущества голографических прицелов заключаются в высокой надежности работы при относительной простоте конструкции, невозможности физической блокировки пучка лучей лазерного излучения, восстанавливающего голограмму, отсутствии бликов и лазерного излучения, распространяющегося в сторону цели. Особенности схемных решений прицелов заключены в необходимости обеспечения стабилизации положения линии визирования при изменении внешней температуры минимальным количеством элементов оптической системы. В работе рассмотрена схема прицела с фокусирующей решеткой, разработанного и запатентованного АО «ГОИ им. С.И. Вавилова». В ней стабилизация положения линии визирования при тепловом изменении длины волны излучения лазерного диода обеспечивается за счет использования двух последовательно установленных дифракционных структур: отражательной – дифракционной решетки и пропускающей – голограммы, формирующей изображение прицельной марки. Минимизация числа элементов оптической схемы прицела достигается за счет использования в ней полифункционального оптического элемента - отражательной рельефно-фазовой голографической решетки, нанесенной на вогнутую сферическую поверхность. Работоспособность и эффективность оптической системы прицела с фокусирующей решеткой проверялись в ходе исследования макета прицела, включающего в себя отражательную голографическую решетку, выполненную на слое халькогенидного стеклообразного полупроводника, и работающую на пропускание квазиобъемную голограмму прицельной марки, изготовленную на коммерчески доступной фотопластинке ПФГ-03М. Исследование макета показало, что оптическая система прицела обеспечивает формирование голограммой безаберрационного изображения прицельной марки и высокое, превышающее 85%, интегральное пропускание в видимой области спектра.

## РОЛЬ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА В ИННОВАЦИОННОМ ПРОЦЕССЕ

Самохина И.А., Тибилев А.С.

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
Редакция «Оптического журнала» АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Существуют две модели инновационного процесса:

- накопление знаний, завершающееся технологическим «озарением»;
- накопление знаний до уровня экономической целесообразности перестройки старой технологии.

Анализ представляемых в Оптический журнал публикаций показывает, что и авторы, и рецензенты чаще всего не осознают ни ту, ни другую инновационную перспективу. Это видно уже по постановке задачи в традиционной вступительной части прикладной статьи:

- область применения результатов исследования представляется в слишком общем, «газетном» стиле;
- необходимость выполнения работы редко обосновывается технологической проблемой;
- редкий ныне обзор результатов предшественников практически никогда не представляется как «технологический вектор».

Отсутствие технологической составляющей в постановке задачи приводит к отсутствию обоснованных выводов о практической технологической ценности выполненной работы.

Описанная тенденция свидетельствует о недостаточном технологическом кругозоре большинства наших исследователей (за исключением, пожалуй, материаловедов). А без такого кругозора не будет ни «озарений», ни понимания практической ценности результатов исследований, то есть не будет инновации, а будет бесконечное накопление знаний.

Что могут сделать в этих условиях в рамках своей компетенции редакция и редколлегия прикладного журнала? Требовать четкого обозначения конкретной практической проблемы, на решение которой нацелена статья. Это часто улучшает всю статью, но велика вероятность потерять автора.

Значительно выше возможности журнала при экспертизе. Ресурсоемкие инновации перед внедрением требуют тщательной экспертизы. Преимущества журнала как орудия такой экспертизы заключаются в ее «многоуровневости»:

- редакционная экспертиза,
- анонимная экспертиза специалистов - рецензентов,
- экспертиза редколлегии,
- экспертиза всего сообщества специалистов после публикации,
- и, наконец, самоконтроль самих авторов: кому охота публично осрамиться.

Современное патентное законодательство позволяет прибегнуть к публикации для такой экспертизы даже до патентования, ничего не потеряв в приоритете.

# ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Пинаев Л.В, Леонтьева Г.В, Иванова Л.А, Серегин А.Г., Пинаев А.Л.

АО «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова»,  
г. Санкт-Петербург, Россия  
Оптика природных сред и экология

Важнейшей задачей при контроле геометрических параметров крупногабаритных изделий является задача образования точной отсчетной базы и ее стабилизация в пространстве и во времени. Решение этой задачи легло в основу прибора «Лазерная струна».

Высокие точностные характеристики, предельная простота, наглядность и удобство в работе, возможность получать информацию о контролируемом объекте в реальном режиме времени, т.е. в процессе непосредственного процесса его изготовления, монтажа, сборки, без предварительной обработки первичной информации являются важнейшими особенностями данного прибора.

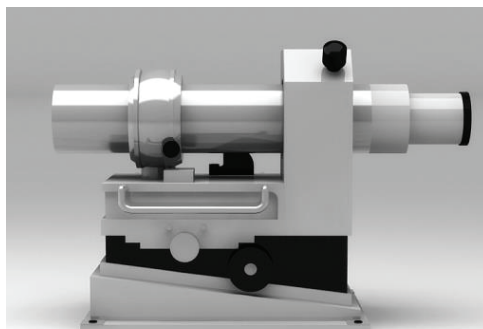


Рисунок 1.



Рисунок 2.

В то же время цена на «Лазерную струну» ниже цен зарубежных аналогов, таких как «Leica», Швейцария; лазерный интерферометр XL -80 фирмы RENISHAW, Англия.

«Лазерная струна» с успехом была использована на предприятии «Пролетарский завод» для контроля соосности машиностроительных изделий (рис. 1), на заводе «Атоммаш» для контроля отклонения от оси удаленных друг от друга отверстий узлов атомного реактора нового поколения (рис. 2).



# **ДИФFUЗНО-РАССЕИВАЮЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

**Безбородкин П.В., Демидов В.В., Хохлов А.В.,  
Тер-Нерсисянц Е.В., Комаров А.В.**

Научно-исследовательский и технологический институт оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Россия  
Материалы и технологии волоконной оптики

Приведены данные о разработке оптических волокон с сердцевинной из кварцевого стекла и полимерной отражающей оболочкой, обладающих эффектом диффузного рассеяния света на длинах в несколько десятков метров. Рассмотрены возможности использования подобных элементов в технике гражданского назначения.

## **Введение**

Оптические волокна на основе кварцевого стекла являются самой совершенной физической средой для транспортировки больших объемов информации на дальние расстояния и обычно не позиционируются в качестве средств передачи излучения видимого диапазона с целью подсветки протяженных либо, напротив, малоразмерных и труднодоступных объектов. В мировой практике для решения таких задач используют более дешевые в производстве и обслуживании пластиковые, или полимерные, аналоги. Однако по причине ограниченной длины диффузного рассеяния света, подверженности влиянию перепада температур и чрезмерного поглощения излучения материалом в определенных спектральных областях для ряда приложений волокна из пластика не могут обеспечить комплекса необходимых эксплуатационных характеристик.

В настоящем докладе обсуждаются результаты разработки серии оптических волокон с сердцевинной из кварцевого стекла и полимерной отражающей оболочкой, дополненной высокодисперсными кристаллическими частицами, наличие которых способствует рассеянию направляемого по сердцевине излучения через боковую поверхность на длинах в несколько десятков метров, для применения в медицинской технике и промышленности.

## **Структурная схема**

Как известно, в оптических волокнах классической геометрии (сердцевина и оболочка выполнены из легированного в разной пропорции кварцевого стекла), электромагнитное излучение удерживается с минимальными потерями мощности в области сердцевины за счет явления полного внутреннего отражения, имеющего место на границе раздела упомянутых сред, и практически не достигает поверхности оболочки [1],

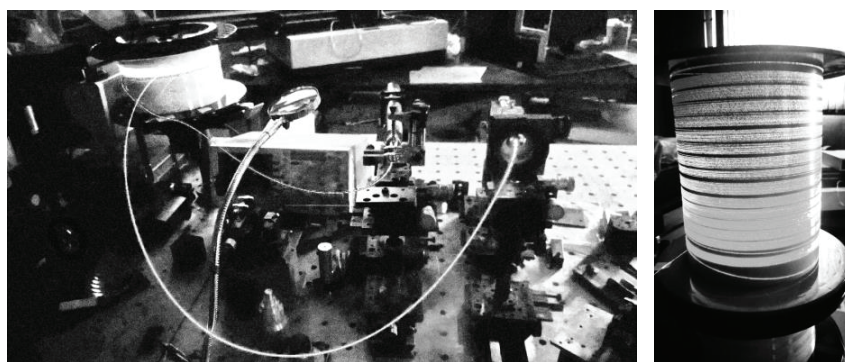


вследствие чего светорассеяние отсутствует. Данный эффект возможен, например, при создании антисветоводной структуры, в которой сердцевина обладает меньшим, чем у оболочки, показателем преломления, либо в результате интеграции центров рассеяния излучения, характерный размер которых сопоставим с длиной волны излучения, в стекло сердцевин. Последняя концепция легла в основу диффузно-рассеивающих оптических волокон компании Corning [2,3]. Вместе с тем интеграция подобных центров в состав стекла сердцевин представляет собой сложную техническую задачу. Опыт авторов данной работы подсказывал, что искомый эффект может быть получен более простым способом, без необходимости высокотемпературного внедрения в стекло сердцевин центров рассеяния излучения.

Предварительными расчетами было установлено, что достаточно образовать двухслойную конструкцию волокна, включающую сердцевину из синтетического кварцевого стекла и отражающую оболочку на основе термически отверждаемого низкопреломляющего полимера со смешанной аморфно-кристаллической структурой. Меньшее по сравнению с кварцевой сердцевиной значение показателя преломления полимерной оболочки способствует удержанию вводимого излучения в сердцевине.

С другой стороны, аморфно-кристаллическая структура слоя полимера минимальной толщины индуцирует частичное преломление и рассеяние света на границе раздела двух сред по мере распространения его по сердцевине, что имеет своим следствием свечение боковой поверхности волокна (при вводе излучения видимого диапазона). Равномерность, интенсивность и длина свечения определяются преимущественно степенью кристалличности полимера.

В соответствии с описанной выше феноменологией были реализованы серии оптических волокон с сердцевиной из чистого (нелегированного) кварцевого стекла марки КУВИ диаметром 200 мкм и оболочкой на основе фторопластового лака толщиной несколько микрометров. Сам по себе лак обладает низкой степенью кристалличности, что нашло отражение в получении образцов волокон с малыми интенсивностью и длиной диффузного рассеяния света. С целью увеличения степени кристалличности лака и, следовательно, интенсивности светорассеяния на этапе, предшествующем термоотверждению лака, в него интегрировались мелкодисперсные порошкообразные частицы наполнителей, в частности, алюмомагниевого шпинели ( $MgAl_2O_4$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), талька ( $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ) и сульфата бария ( $BaSO_4$ ). Добавление в лак  $MgAl_2O_4$  не привело к сколько-нибудь существенному изменению характеристик светорассеяния за исключением появления на поверхности волокна сильно разнесенных по длине отдельных светящихся точек. Применение порошкообразных  $Al_2O_3$  и  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$  в такой же пропорции (98 % лака, 2 % порошка) позволило увеличить интенсивность, однако длина диффузного рассеяния составила не более 3 м. Наибольший эффект наблюдался после интеграции частиц  $BaSO_4$  – образец волокна длиной 100 м характеризовался равномерным интенсивным свечением при вводе лазерного излучения с длиной волны 532 нм мощностью 4.5 мВт (рис. 1).



**Рисунок 1.**

Демонстрация работы диффузно-рассеивающего оптического волокна

Изготовленные в рамках настоящей работы диффузно-рассеивающие оптические волокна имеют ряд перспективных практических применений, например, в части создания на их основе многоуровневых систем общего и локального освещения объектов промышленного и гражданского назначения с высокими CRI-индексом и эргономическими показателями, а также в области декорирования пространства и интерьерной подсветки самого широкого профиля. В настоящее время развиваются методы лечения онкологических и кожных заболеваний, базирующиеся на абляции (направленном разрушении ткани без ее физического удаления) и фотодинамической терапии (воздействии видимого света на фотосенсибилизатор, в результате которого генерируются активные формы кислорода, разрушающие пораженные клетки ткани) и требующие равномерной концентрации светового потока на сравнительно большой площади.

#### Показатели качества

В табл. 1 приведены эксплуатационные характеристики диффузно-рассеивающих оптических волокон, полученных авторами данной работы, в сравнении с аналогичными характеристиками волокон компании Corning 2,3.

**Таблица 1.** Характеристики оптических волокон

Параметр	НИТИОМ	Corning
Диаметр сердцевины, мкм	200 ± 1	170 ± 3
Диаметр оболочки, мкм	208 ± 2	230 ± 10
Длина, м	1-100	1-10
Спектральный диапазон, нм	400-1000	405-1000
Числовая апертура	0.20-0.30	0.35-0.53
Угол обзора, град.	120	120
Радиус изгиба, мм	5	5
Диапазон рабочих температур, °C	-60.. +150	-40.. +85

Обращает на себя внимание несколько меньшее, чем у продукции компании Corning, значение числовой апертуры, обусловленное большим значением показателя преломления отражающей оболочки. Однако, на наш взгляд, величина апертурного угла диффузно-рассеивающего волокна Corning является избыточной, и апертуры около 0.25 достаточно для ввода излучения практически без потерь от сравнительно недорогих лазерных диодов с эффективностью более 80 %.

## Заключение

Результат работы заключается в разработке базового принципа, заложенного в основу эффекта диффузного рассеяния излучения видимого диапазона при распространении его по оптическому волокну с сердцевиной из кварцевого стекла и полимерной отражающей оболочкой, и создании технологии изготовления такого волокна на автоматизированной установке для вытягивания связных волокон. Преимуществами разрабатываемого продукта являются большая длина диффузного рассеяния света и расширенный диапазон эксплуатационных температур, которые позволят полностью заместить пластиковые аналоги в качестве средств локального освещения протяженных общепромышленных и гражданских объектов, в том числе взрывоопасных зон и помещений с высокой влажностью. Возможность получения равномерного интенсивного свечения боковой поверхности волокон определяет также перспективы их применения в медицинской технике, например, в фотодинамической терапии.

После проведения ряда технологических работ, направленных на достижение максимальных показателей механической прочности оптических волокон, продукция будет готова к запуску на рынок.

## Список литературы:

1. А. Снайдер, Дж. Лав, *Теория оптических волноводов*: Пер. с англ. – Радио и связь, 656 с., (1987).
2. S.L. Logunov, E. Fewkes, P.J. Shustack, F.C. Wagner, *Solid-State and Organic Lighting Conf. (Tucson, Arizona, US)*, DT3E, p. DT3E.4, (2013).
3. W.C. Klubben, S.L. Logunov, E.J. Fewkes, J. Mooney, P.M. Then, P.G. Wigley, H. Schreiber, K. Matias, C.J. Wilson, M. Ocampo, *Proc. SPIE*, **9702**, p. 970218, (2016).

## LIGHT-DIFFUSING OPTICAL FIBERS FOR MEDICAL AND INDUSTRIAL APPLICATIONS

**Bezborodkin P.V., Demidov V.V., Khokhlov A.V.,  
Ter-Nersesyants E.V., Komarov A.V.**

Research and Technological Institute of Optical Materials All-Russia Scientific  
Center «S.I. Vavilov State Optical Institute», St. Petersburg, Russia

Data on development of optical fibers with silica core and polymer cladding performing a light-diffusing effect on lengths of several tens of meters are presented. Issues on applying such elements in civil engineering technique are considered.

# СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

Коротаев В.В., Перетягин В.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия  
Светотехника и фотометрия

Настоящая работа посвящена описанию системы, предназначенной для одновременного анализа гониометрических, радиометрических, спектральных (колориметрических) параметров и характеристик излучающих диодов. Также в работе представлены результаты экспериментальных исследований нескольких типов излучающих диодов.

Развитие светодиодных технологий в последние годы существенно улучшило качество освещения, тем самым расширив области применения излучающих диодов. На сегодняшний день излучающие диоды активно используются для уличного, промышленного (декоративного и акцентного) и бытового освещения [1-2]. Такое разнообразие в использовании стало возможным благодаря достаточно быстрому росту энергетических показателей, разнообразию пространственных, спектральных (колориметрических) и электрических характеристик, а также надежности и долговечности данных источников излучения.

Однако для каждого конкретного применения излучающие диоды должны обладать определенными (заданными) гониометрическими, радиометрическими и спектральными (колориметрическими) характеристиками. Исходя из этого, производители постоянно совершенствуют технологии их производства, тем самым расширяя модельный ряд выпускаемой продукции [3]. При этом совершенствование технологий производства излучающих диодов приводит к необходимости обеспечения более точного и комплексного анализа их характеристик. Комплексный анализ необходим как на стадии создания чипов (излучающих кристаллов), так и на стадии создания готовой продукции (например, светодиодов и устройств освещения на их основе). Поэтому исследование параметров и характеристик излучающих диодов является важным этапом производственной цепочки.

Существует множество способов и устройств анализа параметров излучающих диодов. При этом большинство способов предназначено для определения одного параметра (например, светового потока) или одной характеристики (например, углового распределения энергии или спектральной характеристики), а устройства, использующие данные способы, способны производить измерения параметров и характеристик только в одной точке или плоскости освещаемого пространства (за исключением интегрирующих сфер) [4].

Настоящая работа посвящена описанию системы, предназначенной для комплексного анализа и оценки ключевых параметров и характеристик излучающих диодов. Главной особенностью данной системы является возможность выполнения одновременного анализа гониометрических, радиометрических и спектральных (колориметрических) параметров и характеристик излучающих диодов по всей верхней полусфере их изучения. При этом одновременность анализа достигается за счет использования спектральных характеристик, измеренных с помощью спектрометра, в конкретных точках пространства.



**Рисунок 1.**

Система комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов

Способность производить анализ по всей верхней полусфере излучения обусловлена наличием в конструкции комплекса нескольких моторизованных поворотных платформ, предназначенных как для вращения анализируемого излучающего диода вокруг его оптической оси, так и наклона входного окна волоконно-оптического кабеля относительно оптической оси излучающего диода. Такая конструкция (см. рис. 1) позволяет производить пошаговую регистрацию спектральных характеристик излучающего диода при его повороте на известный угол на каждом шаге.

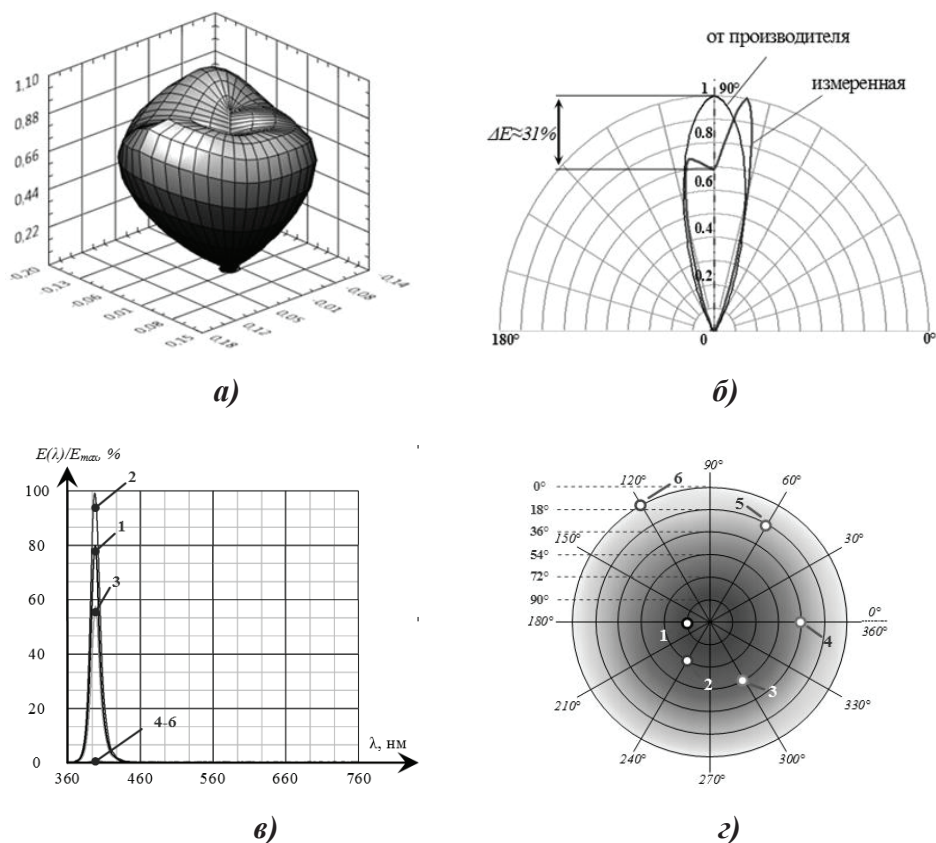
Измеренные (по всей верхней полусфере) спектральные характеристики излучения можно использовать для определения значений энергии, координат цвета и коррелированной цветовой температуры (при необходимости) излучения в каждой точке верхней полусферы. Кроме того, значения, полученные к конкретной координатой пространства, можно использовать для построения трехмерных моделей углового распределения энергии или представления цветовых параметров в виде диаграммы цвета.

Используя данную систему, были исследованы излучающие диоды разных конструкций и цветов свечения. Ниже, в качестве примера, представлены результаты исследования светодиода марки BL-L314VC от Betlux.

Светодиод марки BL-L314VC является узконаправленным излучателем ( $\Theta \approx 11^\circ$ ). Из диаграммы направленности (см. рис. 2 а) видно, что светодиод имеет энергетический провал в центральной части излучения. Было проведено сравнение диаграммы направленности, измеренной с помощью системы, с диаграммой, представленной производителем. Из рис. 2 б видно, что в измеренной характеристике присутствует энергетический провал, величина которого составляет 31%. Появление данного эффекта может быть связано с нарушением технологии при сборке светодиода или при создании линзы, покрывающей излучающий кристалл.

Для наилучшего понимания результатов спектральные характеристики светодиода представлены в произвольно выбранных точках измеренного пространства. При этом каждая характеристика соответствует конкретному положению входного окна волоконно-оптического кабеля относительно исследуемого светодиода. Максимум спектральной характеристики светодиода марки BL-L314VC находится на длине волны 405 нм. Из рис. 2 в видно, что в разных точках пространства максимум первого пика соответствует данной длине волны. Однако разница между спектральной характеристикой 1 и 2 составляет 21%. Так как светодиод излучает в видимой области, для него была построена диаграмма цвета (см. рис. 2 г). Из диаграммы видно, что цвет свечения данного СИД является фиолетово-синим.





**Рисунок 2.**

Измеренные характеристики светодиода BL-L314VC:

- а) трехмерная модель диаграммы направленности, б) результаты сравнения диаграмм направленности, в) спектральные характеристики в произвольно выбранных точках пространства, г) диаграмма цвета

В данной работе представлено описание системы комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов. Данная система способна исследовать излучающие диоды различной конструкции и в широком спектральном диапазоне. Проведенный комплекс экспериментальных исследований данной системы подтверждает ее эффективность и высокий потенциал использования для оценки качества светодиодной продукции на различных стадиях ее производства.

Настоящая работа является продолжением работ коллектива кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО по созданию специализированных устройств подсветки для оптико-электронных систем, приборов и комплексов промышленного контроля с целью обеспечения оптимальных условий наблюдения и анализа.

#### Список литературы:

1. А.В.Карев, Применение светодиодных светильников: прошлое, настоящее, будущее, Полупроводниковая светотехника, №6, с.42-43, (2011).
2. M. Liu, B. Rong, H. Salemink, Evaluation of LED application in general lighting, Optical engineering, 46 (7), pp.1-6, (2007).
3. С.Г. Никифоров, Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества, Компоненты и технологии, № 5, с.205-215, (2005).
4. О.В.Круглов, В.Н. Кузьмин, К.А. Томский, Измерение светового потока светодиодов, Светотехника, №3, с.34-36, (2009)



# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА ПРОДУКТОВ И МАТЕРИАЛОВ

**Коротаев В.В., Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Алёхин А.А.,  
Перетягин В.С., Павленко Н.А.**

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия  
Системы технического зрения, колориметрия

В докладе описывается опыт коллектива авторов кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО по исследованию, разработке и применению оптико-электронных систем цветового анализа различного назначения.

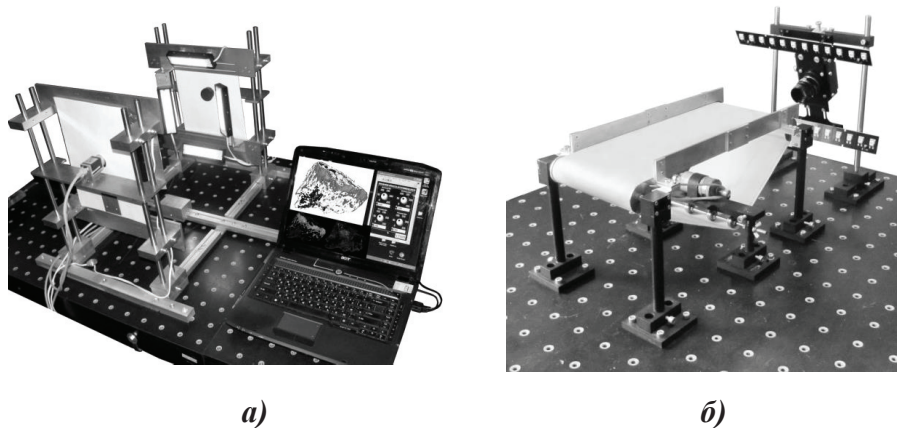
Оптико-электронные системы цветового анализа – класс систем, реализующих регистрацию, обработку и анализ информации о цвете объекта исследования или контроля. Подобная информация актуальна для решения широкого круга прикладных задач и используется, например, в пищевой промышленности – при сортировке плодоовощных и ряда зерновых культур и качественной оценке продуктов питания в пищевых лабораториях; в перерабатывающей промышленности – при сортировке твердых бытовых и промышленных отходов; в горнодобывающей промышленности – при обогащении твердых полезных ископаемых оптическим методом и качественной сортировке драгоценных камней, и т.д.

При этом в ряде практических приложений цвет оценивается визуально, что влечет за собой субъективность анализа и отсутствие измеряемых критериев оценки. Также для решения задач цветового анализа широко используются спектрофотометрический метод с последующим расчетом цветовых характеристик и метод технического зрения.

Основной недостаток спектрофотометрического метода заключается в том, что он либо позволяет получить только интегральную характеристику для всего объекта исследования, либо требует поточечного сканирования его поверхности, что для большинства производственно-технологических процессов неприемлемо вследствие сложной реализации и длительности указанного процесса.

Основным недостатком большинства систем технического зрения (СТЗ), используемых в настоящее время для решения задач цветового анализа, является то, что они осуществляют не собственно анализ цвета объектов исследования как присущих им комплексных характеристик, определяемых свойствами материала, поверхности объекта, его формой, положением в пространстве, особенностями освещения, а измерение некоторых «цветовых параметров» объектов в выбранной цветовой системе координат. Отдельно стоит отметить то обстоятельство, что цветокоррекция собственно СТЗ в этих случаях или не производится вовсе, или осуществляется с помощью механизма встроенных производителем настроек, не пригодных для обеспечения работы СТЗ в режиме «измерения цвета». Как следствие, полученные с помощью подобных СТЗ результаты часто не отличаются не только точностью, но и адекватностью с точки зрения анализируемого цвета.

В рамках настоящей работы коллективом авторов проводится широкий круг исследований по разработке и реализации научно-обоснованного подхода к цветовому анализу объектов различной природы.



**Рисунок 1.**

Макеты оптико-электронных систем цветового анализа:  
 а) для углубленного анализа минеральных образцов в статике,  
 б) для движущихся минеральных образцов

Так, для обеспечения оптимальной с точки зрения решаемой задачи подсветки зоны анализа разработаны подходы к проектированию управляемых многокомпонентных источников света на основе светодиодов [1-2], а также предложены методы экспресс-контроля параметров и характеристик как отдельных светодиодов, так и протяженных источников, в целом [3-5].

Предложен ряд алгоритмических подходов, реализующих цветокоррекцию цветных изображений, полученных с помощью СТЗ [6-8], и их анализ [9-10].

Разработанные подходы и алгоритмы использованы при проведении исследований представительных проб золотосодержащих руд (совместно с НПП «ГеоТестСервис», г. Москва) [11], кварц-полевошпатового сырья [12] и шунгитовых пород [13] (совместно с Институтом геологии КарНЦ РАН).

Исследования проводились на экспериментальных установках, внешний вид которых приведен на рис. 1.

Также на кафедре оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО проводятся исследования возможностей контроля качества продуктов питания по цвету: мясного сырья и мясопродуктов, продуктов растительного происхождения (совместно с Институтом холода и биотехнологий Университета ИТМО); куриного и перепелиного яйца (совместно с Санкт-Петербургским государственным аграрным университетом).

### **Заключение**

Результаты работы в рамках данного направления исследований предполагается использовать для создания:

- оптико-электронного аппаратно-программного комплекса для оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом в лабораторной и полевой модификациях;
- оптического сепаратора минерального сырья повышенной селективности;
- оптико-электронных приборов экспресс-анализа и контроля качества пищевого сырья и продуктов питания животного и растительного происхождения.

### **Список литературы:**

1. Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, В.С. Перетягин, М.Г. Серикова, А.Н. Чертов, Патент № 2494495, (2013).
2. В.С. Перетягин, А.Н. Чертов, Свидетельство № 2015617103, (2015).

3. В.С. Перетягин, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Е.Н. Пантюшина, В.В. Коротаев, Патент № 2547163, (2015).
4. Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, Е.Н. Кулешова, О.Ю. Лашманов, А.Н. Тимофеев, А.Н. Чертов, Патент № 2509988, (2014).
5. В.С. Перетягин, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, В.В. Коротаев, *Устройство для контроля источников излучения*. Патент на полезную модель № 138629, (2014).
6. Д.Д. Шитов, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Свидетельство № 2013615782, (2013).
7. Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Свидетельство № 2012616390, (2012).
8. Д.Б. Петухова, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Свидетельство № 2013616760, (2013).
9. Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, В.В. Коротаев, А.Н. Тимофеев, Свидетельство № 2012613938, (2012).
10. Е.Н. Кулешова, В.В. Коротаев, А.Н. Чертов, Е.В. Горбунова, А.В. Пантюшин, Свидетельство № 2011613482, (2011).
11. Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов А.Н., А.М. Ольховский, *Обогащение руд*, №3, с.35-40, (2015).
12. А.Н. Чертов, Е.В. Горбунова, Л.С. Скамницкая, Т.П. Бубнова, *Обогащение руд*, №4, с.54-59, (2015).
13. Р.В. Садовничий, Н.Н. Рожкова, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, *Обогащение руд*, №1, с.10-15, (2016).

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСАХ МО- НИТОРИНГА ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**Коротаев В.В., Васильев А.С.**

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия  
Многоспектральные оптико-электронные системы

В работе рассмотрены вопросы применения методов комплексирования изображений для многоспектральных оптико-электронных комплексов мониторинга техносферной безопасности. Внедрение методов комплексирования изображений в комплексы мониторинга позволит расширить характеристики существующих систем безопасности и обеспечить выполнение задач по охране критических и общегражданских объектов.

### **Введение**

Мониторинг и наблюдение являются важнейшими элементами оценки опасности технологических процессов и природных систем – безопасности жизнедеятельности че-

ловека в техносфере. Современные элементы комплексов мониторинга, используемые для наблюдения за состоянием окружающей среды и объектами, обладают достаточно широким набором функций и характеристик. Разработанные «ночные», «противотуманные», «высокого разрешения» телевизионные камеры и приемники излучения широкого спектрального диапазона активно используются для наблюдения и мониторинга. Однако, как показывают эксперименты [1,2], вероятность обнаружения и точность дешифровки могут быть существенно увеличены за счет синхронного совместного использования набора разноспектральных каналов методом комплексирования изображений для обеспечения задач круглосуточного наблюдения и мониторинга.

### Структурная схема

Под комплексированием изображений понимается такое совмещение нескольких изображений, которое приводит к повышению информативности по сравнению с анализируемыми отдельными исходными изображениями. Рассмотрим структуру комплексирования изображений на примере многоспектральной ОЭС (рисунок 1).

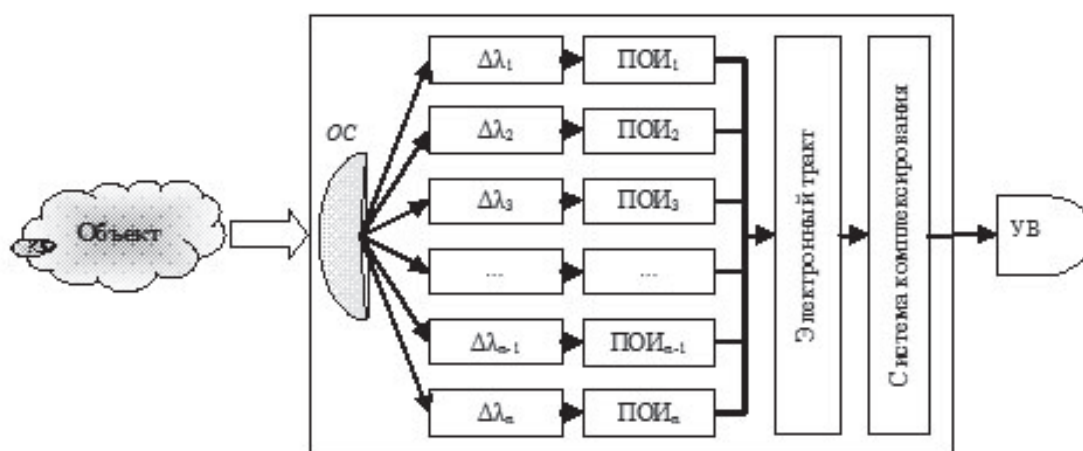


Рисунок 1.

Структурная схема многоспектральной ОЭС комплексирования изображений

Приемная оптическая система (ОС) собирает поток излучения и формирует изображение пространства объекта. Излучение объекта в широком спектральном диапазоне. Система разделения всего спектрального диапазона работы системы делит на  $n$  отдельных каналов ( $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n$ ) весь спектр излучения объекта, который попадает на узкодиапазонный приемник излучения (ПОИ<sub>1</sub>, ПОИ<sub>2</sub>, ..., ПОИ<sub>n</sub>), преобразующий оптический сигнал в электрический. В электронном блоке происходит обработка сигналов, затем система комплексирования объединяет изображения, соответствующие разным спектральным диапазонам, в единое изображение. Устройство вывода передает комплексированное изображение на дисплей или другие устройства дешифрования.

На выходе электронного блока формируются цифровые изображения  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , представляющие двумерную функцию распределения освещенности. Результатом комплексирования изображений является изображение  $Z$ , представляющее объединенное множество:

$$F_1, F_2, \dots, F_n \subset \mathbf{Z}^r, \quad (1)$$

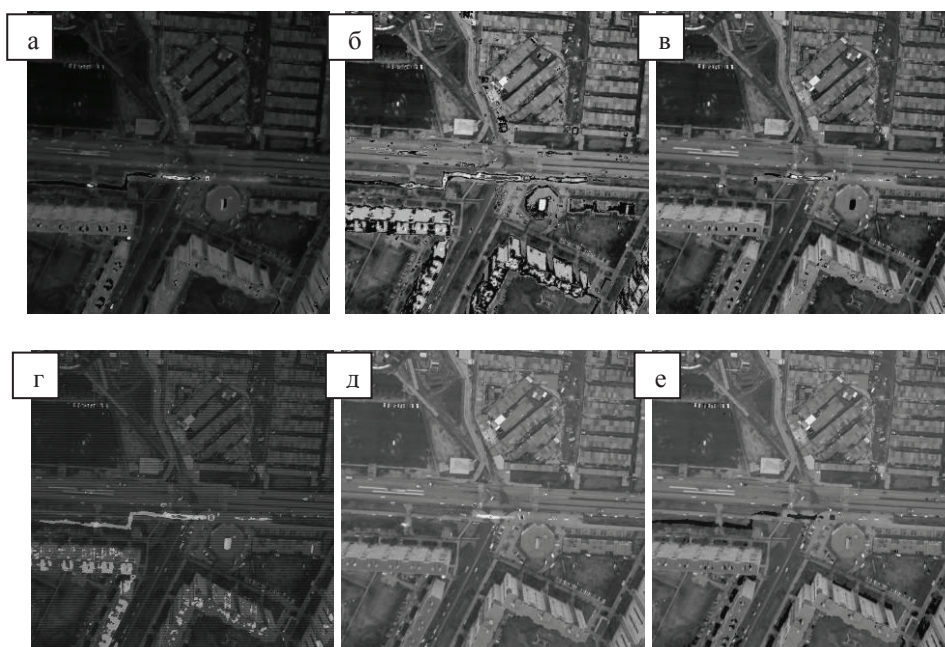
где  $r$  - размерность комплексированного изображения, для большинства случаев равная двум, однако в некоторых задачах (например, в задачах с применением объемных



изображений) может быть больше двух [3,4]. В общем случае задача комплексирования сводится к нахождению функций пространственного преобразования и преобразования яркости. Пространственное преобразование заключается в устранении геометрических искажений между парой изображений, полученных в одно и то же время для одного участка местности. Необходимость учета преобразования яркости возникает из-за возможного изменения освещения, сезонных и суточных изменений. Потребность применения как пространственного, так и яркостного преобразования обусловлена также и тем, что совмещаемые изображения получены при помощи различного вида приемников.

### Показатели качества

Выбор метода комплексирования для многоспектральной системы мониторинга является проблемноориентированным решением и зависит от конкретной задачи. На рисунке 2 представлены результаты комплексирования пар изображений, полученных в инфракрасном и видимом спектральных диапазонах при мониторинге тепловых сетей г. Санкт-Петербурга.



**Рисунок 2.**

Результаты комплексирования изображений:

- а) метод весовой функции
- б) метод усреднения; в) метод степенного преобразования;
- г) метод чересстрочного комплексирования; е) метод максимума; д) метод маски

Как видно на результатах методов *б* и *г* присутствует много лишних деталей, для методов *е* и *д* произошла существенная потеря информации. Методы *а* и *в* показали лучшие результаты, сохранив необходимые информативные признаки двух изображений. Для объективной оценки качества методов комплексирования необходимо применение критериев оценки определения эффективности преобразований, включающих оценку информационной составляющей на результирующем изображении и качественную оценку его восприятия.

## Заключение

Метод комплексирования разносектральных изображений позволяет повысить и увеличить обнаружительную эффективность многосектральных ОЭС, упростить процесс восприятия и анализа получаемого изображения. Результаты исследования применимы при решении широкого круга задач:

- мониторинга и анализа риска аварий на опасных производственных объектах, территориях населенных мест и городских агломераций, районов АЭС;
- наблюдение и контроль за объектами горно-металлургической и химической отраслей (контроль промышленных сточных вод, нефтяных загрязнений акваторий, локальных загрязнений почвы),
- контроль техногенного воздействия гидротехнических сооружений, прогноз и предупреждение опасных геодинамических процессов.

Результаты исследования применимы также и в смежных областях, таких как военная техника и техника МЧС: в качестве портативных многосектральных наблюдательных систем солдат для расширения человеческих возможностей на поле боя; систем наблюдения стационарных командных пунктов с противодиверсионной целью; каналов наблюдения роботизированных систем разведки и противодействия терроризму, поиска людей при завалах и техногенных катастрофах.

## Список литературы:

1. В.А.Овсянников, Я.В.Овсянников, В.Л.Филиппов. *Оценка эффективности комплексирования разносектральных изображений*, Оборонная техника, №6-7, 2010
2. В.П.Смирнов. *Эффективность комплексирования разноканальных изображений при опознавании объектов*, Оптический журнал, №2, 1992
3. О.Ю.Аксенов. *Совмещение изображений*, Цифровая обработка сигналов. № 3, стр. 51-55, 2005
4. F. Al-Wassai, N. Kalyankar, A. Al-zuky, *The IHS Transformations Based Image Fusion*, Journal of Global Research in Computer Science, Vol. 2, №5, 2011

## APPLICATION OF IMAGE FUSION FOR MULTISPECTRAL OPTOELECTRONIC MONITORING SYSTEMS FOR TECHNOSPHERE SAFETY

**Korotaev V.V., Vasilev A.S.**

ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

This article is devoted to consideration of the issues relating to digital images fusion of the multispectral optoelectronic systems. The images fusion formation methods and its application are studied.



# РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПАНОРАМНОГО ФОТОАППАРАТА

**Коротаев В.В., Васильев А.С., Пантюшин А.В.**

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург, Россия  
Фототехника

В работе рассмотрены вопросы разработки, реализации и применения панорамного цифрового фотоаппарата с 3-мя независимыми оптическими каналами.

## **Введение**

Панорамная фотосъемка – это разновидность съемки с увеличенным углом обзора (обычно по горизонтали), которая позволяет регистрировать на фотоснимке больше пространства, чем при использовании обычных фотоаппаратов. Панорамная фотосъемка существовала даже тогда, когда еще не было специальных панорамных фотокамер. Чтобы создать панораму, делали серию снимков, печатали, обрабатывали стыки и склеивали части изображения в единое панорамное изображение [1]. Позже появились панорамные фотоаппараты. Одними из самых известных стали камеры «Горизонт», выпускаемые на Красногорском заводе им. С.А. Зверева [2]. При существующей потребности в получении высококачественных панорамных снимков, на сегодняшний день альтернативы цифровым методам обработки для получения панорамы отсутствуют. Поэтому предлагается разработать и реализовать цифровой панорамный фотоаппарат, предназначенный для фото-профессионалов, решающий задачи получения качественных художественных панорамных снимков.

## **Структурная схема**

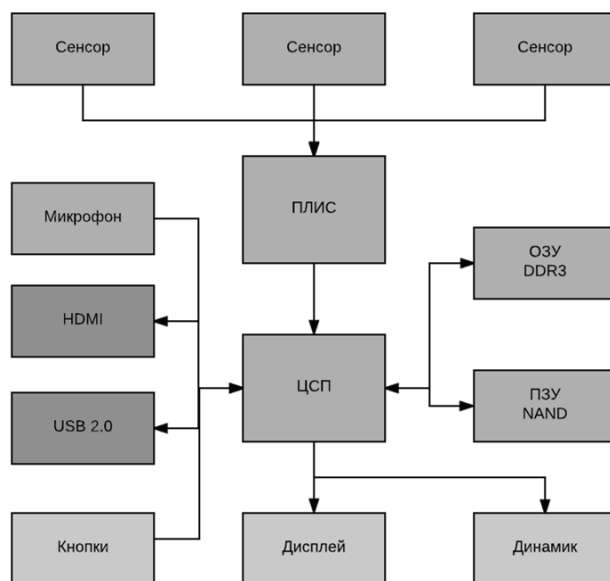
Цифровой панорамный фотоаппарат строится на базе 3-х матричных сенсоров высокого разрешения, позволяющих получать три синхронных изображения (Рисунок 1). Предварительная обработка изображений осуществляется в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), которая решает задачи по настройке сенсоров, управлению/коррекции экспозицией, настройке баланса белого, расчету коэффициентов для реализации алгоритма сшивки 3 изображений в единый панорамный снимок.

Обработанные изображения по высокоскоростному интерфейсу PCIe передаются на цифровой сигнальный процессор (ЦСП), который реализует алгоритм панорамной сшивки изображений, а также отвечает за программно-аппаратную реализацию алгоритмов сжатия (jpeg, h.264) и поддержку периферии электронных компонентов фотоаппарата.

Результирующая информация может быть выведена по интерфейсам USB 2.0 для передачи на персональный компьютер или HDMI для вывода на широкоэкранный монитор. Звук, записанный через встроенный микрофон, выводится через внутренние динамики. Информация также может быть записана на внешнем носителе информации типа SD memory card (SD).

Управление панорамным фотоаппаратом осуществляется с использованием кнопок и информации, выводимой в виде меню, на экран дисплея.

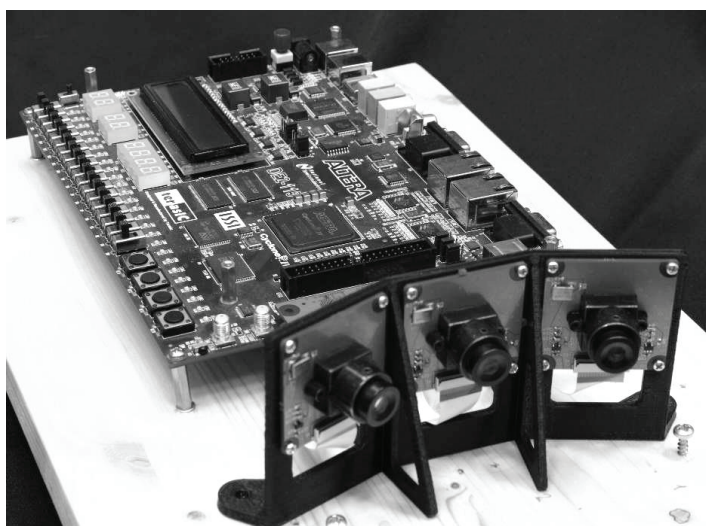
Память программы фотоаппарата хранится на внутреннем постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) типа NAND. Промежуточные значения вычислений хранятся в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) типа DDR3. На рисунке 2 представлен реализованный макет цифрового панорамного фотоаппарата на базе 3-х КМОП сенсоров фирмы Aptina и отладочной платы Terrasic DE2-115.



**Рисунок 1.**  
Структурная схема цифрового панорамного фотоаппарата

### Показатели качества

Предлагаемая схема построения на основе трех независимых оптических каналов обладает такими преимуществами как улучшенное разрешение панорамного снимка за счет применения 3 высококачественных матричных приемников с минимальной зоной перекрытия.



**Рисунок 2.**  
Макет цифрового панорамного фотоаппарата

Независимость оптических каналов также позволяет получать синхронные по времени изображения, что позволяет производить панорамную съемку динамических событий (например, спортивных соревнований или потока автотранспорта).

### **Заключение**

На сегодняшний день панорамная фотография становится все более популярной, в том числе благодаря цифровым технологиям обработки с применением метода «сшивки» изображений, однако такой подход обладает целым рядом недостатков, поэтому получение качественной художественной фотографии возможно только с применением специальной панорамной камеры. Предлагаемая схема цифрового панорамного фотоаппарат с 3-мя независимыми каналами позволяет получить качественный панорамный снимок высокого разрешения в режиме реального времени.

Реализация предлагаемого проекта может быть осуществлена в виде модернизации уже существующего опытного образца камеры подобного класса Horizon D-L3, производства Красногорского завода им. С.А. Зверева. На выходе ожидается результат в виде уникальной профессиональной фотокамеры, предназначенной для узкого рынка фото-профессионалов, занимающихся художественной съемкой интерьеров, архитектурных объектов, спортивных событий, также возможно применение продукта в смежных отраслях, например, в криминалистике и военной сфере.

### **Список литературы:**

1. А. Акимов. *Панорамное удовольствие*, Foto&Video №1, 2005
2. О фотоаппаратах семейства «Горизонт» на сайте Научно-технического центра Красногорского завода, электронный ресурс <http://www.zenitcamera.com/archive/horizon/index.html>
3. Н.П. Яблоков. *Криминалистика*, 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Юристъ, 2005

## **PANORAMIC DIGITAL CAMERA**

**Korotaev V.V., Vasilev A.S., Pantyushin A.V.**  
ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

The paper discusses the issues of development, implementation and application of the panoramic digital camera with 3 independent optical channels.

# **ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СЕРИЙНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ АСФЕРИ- ЧЕСКОЙ ОПТИКИ НА ОСНОВЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕПЛИКАЦИИ С ВЫСОКОТОЧНЫХ МАСТЕР-МАТРИЦ**

**Ахметов М.М., Гайнутдинов И.С., Иванов В.П., Лукин А.В.,  
Мельников А.Н., Могилюк И.А.**

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт  
прикладной оптики», г. Казань, Россия  
Инновационные базовые оптические технологии

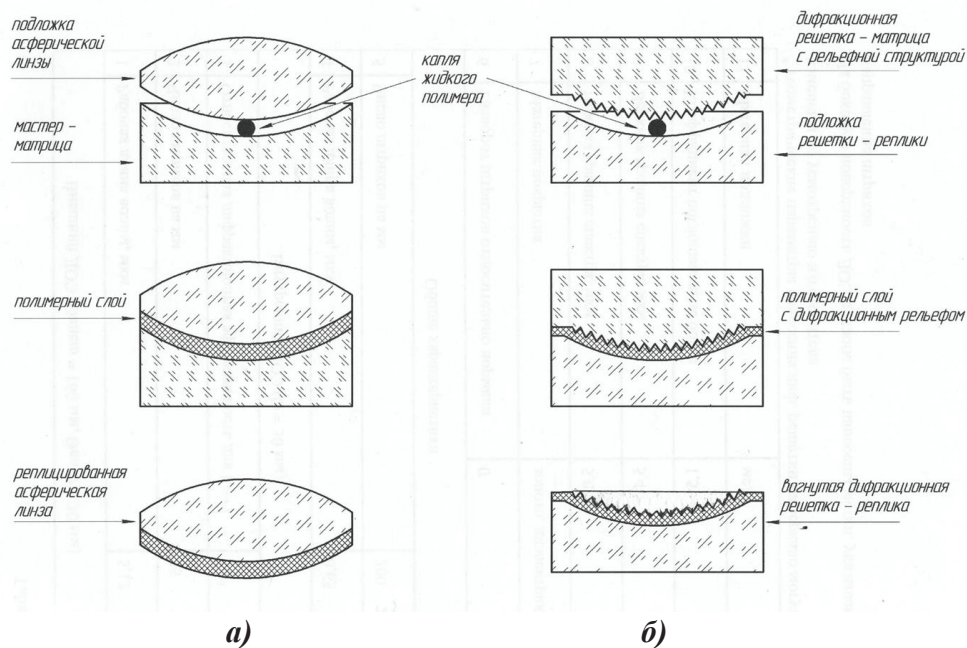
В докладе рассмотрены задачи и особенности практической реализации высокопроизводительной технологии формообразования асферических поверхностей линз и зеркал широкой номенклатуры в обеспечение серийного выпуска оптических и оптико-электронных приборов и систем гражданского и двойного назначения.

## **Введение**

Результаты оценки мирового рынка асферической оптики [1], с учетом прогноза ежегодного роста объема выпуска этих элементов, свидетельствуют, что в настоящее время мировой объем выпуска стеклянной асферической оптики превышает один млрд. изделий в год и сохраняет устойчивую тенденцию роста; тем не менее серийное производство асферики является «узким» местом в технологии выпуска многих видов оптических и оптико-электронных приборов и систем. Организация серийного и массового выпуска комбинированных асферических оптических элементов (состоящих из стеклянной основы с тонким полимерным асферическим слоем) позволит в значительной степени снять эти ограничения.

Основными достоинствами технологии репликации являются многократное превосходство по производительности по сравнению с другими известными технологиями формообразования асферических поверхностей и высокая идентичность получаемых оптических элементов-реplik. Комбинированные линзы и зеркала отличаются высокой устойчивостью к внешним воздействиям (в том числе к колебаниям температуры и влажности) и временной стабильностью; обладают основными преимуществами «стеклянной» оптики по сравнению с полимерной, но при этом себестоимость их серийного изготовления существенно ниже. Это обстоятельство, по-видимому, является главным стимулом для развертывания в последние годы поисково-исследовательских работ в данном направлении в ряде ведущих фирм [2 – 5].

Экономические и технологические трудности получения высокоточных и износоустойчивых асферических мастер-матриц являются главным препятствием для осуществления серийного и массового выпуска комбинированных оптических элементов (линз и зеркал) с асферическими рабочими поверхностями, хотя основные технические решения



**Рисунок 1.**

Упрощенная принципиальная схема процессов репликации:

- а) выпуклой асферической поверхности линзы,
- б) вогнутой рельефно-фазовой дифракционной решетки

в этом направлении были найдены и опробованы в те же годы, что и для репликации дифракционных решеток. Прецизионное формообразование асферических поверхностей на основе использования разрабатываемых в Государственном институте прикладной оптики с 1960-х годов лазерно-голографических методов и средств технологического и аттестационного контроля формы таких поверхностей позволили преодолеть эти трудности.

### Структурная схема

Процессы репликации рельефно-фазовых структур оптических элементов дифракционной оптики (рельефно-фазовых дифракционных решеток, синтезированных голограммных оптических элементов, в том числе киноформов) и рабочих поверхностей элементов асферической оптики практически идентичны. Это позволяет основные звенья технологических цепочек (выбор и подготовка полимерных материалов, участки репликации, химической, термо- и фотополимеризации, вакуумных и специальных покрытий и др.) реализовать как общие для обоих типов изделий. В обоих случаях возможна организация конвейерной формы серийного производства соответствующих реплик. На рис. 1 в качестве иллюстрации представлен принцип получения реплик: выпуклой асферической поверхности линзы (рис. 1а); вогнутой рельефно-фазовой дифракционной решетки (рис. 1б).

В обоих случаях возможно и целесообразно использование подложек с шероховатыми (шлифованными) поверхностями. Практика показывает, что при этом существенно улучшается адгезия полимера к рабочей поверхности подложки, а также снижаются производственные затраты.

### **Показатели качества**

Разрабатываемая в АО «НПО ГИПО» высокопроизводительная технология для серийного и массового изготовления линз и зеркал с асферическими рабочими поверхностями обеспечивает снижение себестоимости выпуска таких деталей до уровня себестоимости сферической оптики.

Экономические показатели разрабатываемой технологии позволят выпускать серийно конкурентоспособные отечественные оптические и оптико-электронные приборы гражданского и двойного назначения на десятки миллионов долларов США в течение 2 – 3 лет после завершения инновационного проекта. В свою очередь, это позволит решить проблему импортозамещения и открывает путь к выходу этого вида отечественной продукции на зарубежные рынки за счет наилучшего значения показателя «цена-качество».

### **Объем инвестиций**

Объем потребных инвестиций для разработки и запуска проекта в серийное производство составляет ориентировочно 150 млн. руб., в том числе затраты на приобретение специального технологического оборудования (блок «чистых комнат», вакуумная установка с комплектом измерительных средств, оптические шлифовальные станки с ЧПУ) – 90 млн. руб., опытно-технологические работы – 60 млн. руб. Прогнозируемый срок окупаемости проекта – 2-й год после завершения данного инновационного проекта.

### **Заключение**

Реализация предлагаемого инновационного проекта позволит удовлетворить в полном объеме потребности отечественных производителей оптических и оптико-электронных приборов и систем различного назначения, а также осуществлять поставки на экспорт.

### **Список литературы:**

1. R.E. Fischer, D. Hileman, SPIE's OE magazine, pp. 25 – 27, (2004).
2. M. Muranaka, M. Takagi, T. Maruyama, Proc. SPIE, 896, pp. 123 – 131, (1988).
3. D. Vicker, R. LeBlanc, Proc. SPIE, 4369, pp. 642 – 648, (2001).
4. X. Cheng, D. Xu, Q. Hao, Proc. SPIE, 6034, pp. 60341S-1 – 60341S-6, (2006).
5. Q. Wang, Yu. Zhao, L. Zhang, J. Yu, Proc. SPIE, 7655, pp.76551S-1 – 76551S-5, (2010).
6. А.Ф. Белозёров, Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, А.Н. Мельников, Фотоника, №4, с. 12 – 32, (2014).



# ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ «СОЛНЕЧНО-СЛЕПОГО» УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ФИЛЬТРА НА ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКЕ «ORTUS 700»

Муравьев Е.А, Малафеев И.Д.

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, Россия  
Продукция двойного назначения: технологии, продукты, решения

В докладе приведены особенности изготовления покрытий для «солнечно-слепого» ультрафиолетового (УФ) фильтра на вакуумной установке «ORTUS 700».

## Введение

Интерес к УФ области спектра обусловлен тем, что в атмосфере и на поверхности Земли практически отсутствуют естественные источники излучения с длиной волны менее 285 нм. Поэтому, если выделить из всего спектра только часть УФ области, то излучающие в данном диапазоне объекты будут хорошо обнаруживаться прибором, что значительно повысит его эффективность.

## Структурная схема

К высокопрозрачным пленкообразующим материалам для УФ области можно отнести оксид гафния II ( $\text{HfO}_2$ ) и оксид кремния II ( $\text{SiO}_2$ ). Они имеют внутренние напряжения разных знаков, что необходимо для предотвращения отслаивания покрытия. В качестве подложки для обеспечения максимального пропускания в области спектра менее 285 нм использовано кварцевое оптическое стекло марки КУ-1 с показателем преломления ( $n$ ) равным 1,45 [1,2].

Спектральная ширина интерференционных зеркал из  $\text{HfO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  по уровню пропускания ( $T$ ) 0,04% составляет в короткой части заданной области подавления фона  $\sim 50$  нм, а в длинноволновой  $\sim 100$ -110 нм. Поэтому для перекрытия области 300-1000 нм понадобилось бы нанесение не менее 9 интерференционных зеркал, а с учетом требования по уровню фона в  $10^{-7}$  это число необходимо удвоить и даже утроить [3,4,5]. Чтобы исключить нанесение такого большого количества интерференционных зеркал необходимо использовать цветные оптические стекла марки УФС2, которые подавляют области спектра 400-650 нм и 800-1000 нм.

Теперь задача значительно упрощается, и необходимо подавить только две области 300-400 нм и 650-800 нм, что выполняется всего тремя интерференционными зеркалами на диапазоны: 300-350 нм, 350-400 нм, 650-800 нм. На вакуумной установке «ORTUS 700» изготавливаются зеркала для областей 350-400 нм и 650-780 нм.

## Показатели качества

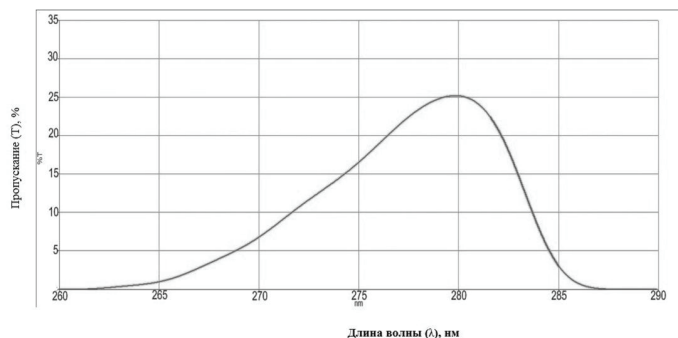
Особенности вакуумной установки «ORTUS 700» и технология изготовления покрытий на ней позволили значительно повысить характеристики зеркал и, соответственно, выход готовой продукции:

1. Безмасляная откачка остаточных газов из вакуумной камеры с помощью турбомолекулярного насоса;

2. Независимая система охлаждения оборудования за счет автономного chillera с программной регулировкой температуры воды;
3. Практически полная автоматизация процессов;
4. Возможность испарения вещества в гранулированном виде, что позволило перерабатывать использованный материал и применять его многократно;
5. Использование прямой подачи реактивного газа (кислорода) к тигелю испарителя в процессе нанесения оксидов повышает пропускание в УФ и видимой областях спектра в среднем на 2- 4 %.

### Заключение

Результатом работы является УФ-фильтр, спектральная характеристика которого представлена на рис. 1.



**Рисунок 1.** Спектральная характеристика УФ-фильтра

Возможности вакуумной установки «ORTUS 700» позволили увеличить количество чередующихся интерференционных слоев зеркал, что сделало саму конструкцию покрытия более устойчивой.

Было подобрано оптимальное количество реактивного газа (кислорода), подаваемого непосредственно к тигелю испарителя для дополнительного окисления пленок прямо в вакуумной камере. Также были подобраны температура и оптимальная скорость испарения пленкообразующих материалов, которые увеличили пропускание в рабочем диапазоне фильтра системы.

Все это позволило получить пропускание фильтра в области спектра менее 285 нм  $\geq 20\%$ , а остаточное пропускание в области спектра 290-800 нм составило менее  $10^{-9} \%$ . Также, вследствие высокой повторяемости результатов, увеличено количество собираемых комплектов фильтров.

### Список литературы:

1. И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин, *Интерференционные покрытия для оптического приборостроения*, 592с., (2002).
2. И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, А.В. Михайлов, В.П. Иванов, Г.И. Абзалова, *Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения*, 423с., (2003).
3. Т.Н. Крылова, *Интерференционные покрытия*, 224с., (1973).
4. И.С. Гайнутдинов, Р.Г. Сафин, Р.С. Сабиров, М.Х. Азаматов, *Солнечно-слепой УФ фильтр для УФ области спектра*, *Оптический журнал*, **74**, №3, с.72-74, (2007).
5. И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, М.Х. Азаматов, Р.Т. Каримов, Р.Г. Сафин, Г.И. Абзалова, *Достижение предельных характеристик просветляющих интерференционных покрытий*, *Оптический журнал*, **74**, №3, с.75-78, (2007).

# ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ PbTe-ZnSe

Кольцов А.Ю., Хасанов А.М.

АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань, Россия  
Инновационные проекты. Продукция двойного назначения: технологии, продукты, решения

Представлены расчетные результаты изменения спектральных характеристик 4-х типов фильтрующих покрытий на основе пары материалов PbTe-ZnSe при криогенных температурах, также показана возможность компенсации смещения спектральных характеристик узкополосного фильтра путем подбора резонансного слоя.

В современных оптико-электронных приборах для выделения заданных областей спектра широко применяются фильтрующие оптические элементы с многослойными интерференционными покрытиями. Для повышения чувствительности аппаратуры фотоприемные устройства (входное окно с фильтрующим покрытием и фотоприемник) необходимо охлаждать до температуры жидкого азота ( $T = \text{минус } 196^\circ\text{C}$ ). Охлаждение фильтрующего покрытия приводит к изменению его спектральной характеристики. Это связано с тем, что при низких температурах показатели преломления и толщины слоев интерференционных покрытий изменяются, что должно учитываться при расчете конструкций покрытия[1].

Фильтрующие покрытия можно разделить на 4 основных типа:

1. Фильтр блокирующий коротковолновый (БК);
2. Фильтр блокирующий длинноволновый (БД);
3. Узкополосный фильтр;
4. Полосовой фильтр.

При конструировании фильтрующих систем, как правило, используют сочетание из нескольких типов фильтров, так как зоны блокировки фильтров недостаточны для перекрытия всей заданной области спектра.

Нами были экспериментально определены изменения показателя преломления и оптических толщин слоев пленкообразующих материалов ZnSe, PbTe при изменении температуры от  $25^\circ\text{C}$  до минус  $196^\circ\text{C}$ .

Для пленок ZnSe показатель преломления составил  $n=2.35$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $n=2.25$  при минус  $196^\circ\text{C}$ . Оптическая толщина  $g$  (выраженная в долях  $\lambda/4$ ) составила  $g=1$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $g=0.97$  при минус  $196^\circ\text{C}$ .

Для пленок PbTe показатель преломления составил  $n=5.3$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $n=5.6$  при минус  $196^\circ\text{C}$ . Оптическая толщина (выраженная в долях  $\lambda/4$ ) составила  $g=1$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $g=1.055$  при минус  $196^\circ\text{C}$ .

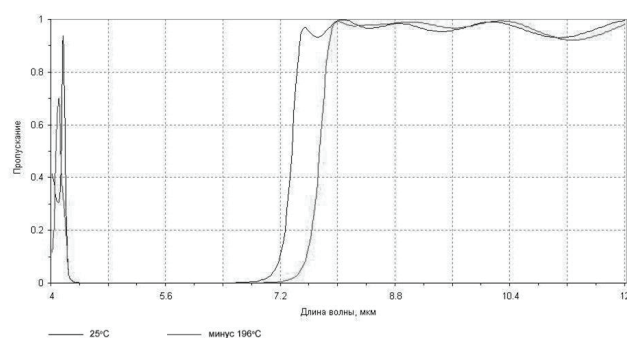
Измерения проводились для диапазона 5-12 мкм.

Отметим разнонаправленное изменение оптической толщины пленок ZnSe и PbTe,

что может приводить к значительным изменениям в спектральных характеристиках многослойных интерференционных покрытий, особенно для узкополосных фильтров. Изменение отношения показателя преломления

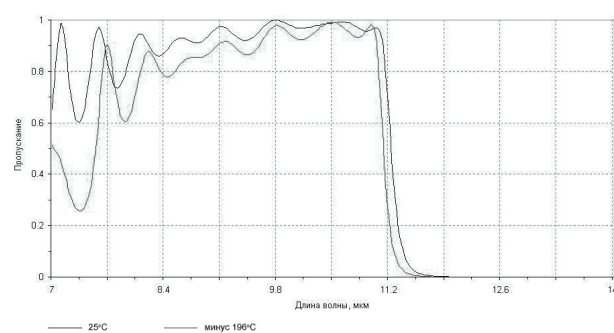
$$\frac{n_{PbTe}}{n_{ZnSe}} \text{ с } 2.255 \text{ до } 2.488 \text{ приводит к уширению полосы блокировки отрезающих}$$

фильтров и к сдвигу полосы отрезания по уровню  $0,5\tau_{\max}$  для коротковолнового блокирующего фильтра (рис. 1)  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,0543 \cdot \lambda_{\text{нл}}^{0,5}$ , по уровню  $0,1\tau_{\max}$   $\Delta\lambda_{0,1} = 0,05 \cdot \lambda_{\text{нл}}^{0,1}$ , в длинноволновую сторону. Для длинноволнового блокирующего фильтра (рис.2) значения сдвига меньше  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,01 \cdot \lambda_{\text{нл}}^{0,5}$   $\Delta\lambda_{0,1} = 0,0098 \cdot \lambda_{\text{нл}}^{0,1}$ , где  $\lambda_{\text{нл}}$  - длина волны при  $25^\circ\text{C}$ . Это связано с тем, что вместе с уширением полосы блокировки из-за увеличения отношения показателей преломления происходит небольшой сдвиг всей полосы в длинноволновую область спектра, связанный с появлением неравнотолщинности слоев, для PbTe с  $g=1$  до  $g=1,055$ , а для слоев ZnSe с  $g=1$  до  $g=0,97$ , в результате чего происходит небольшая компенсация коротковолнового фронта.



**Рисунок 1.**

Фильтр блокирующий коротковолновый

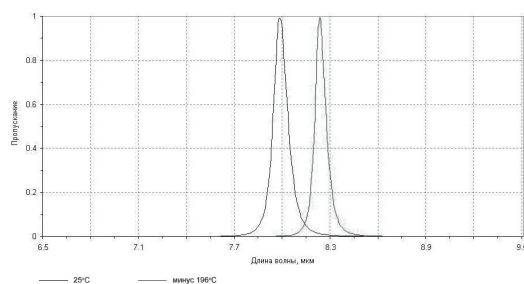


**Рисунок 2.**

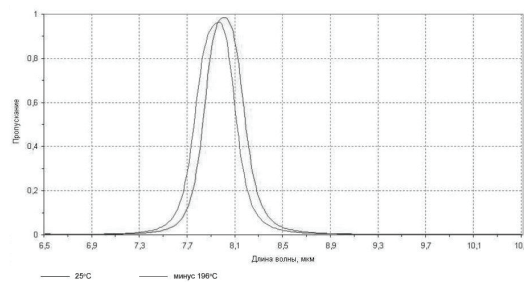
Фильтр блокирующий длинноволновый

На рис. 3 приведено изменение спектральной характеристики двойного узкополосного фильтра конструкции НВН2ВНВН В НВН2ВНВНН (Н-слой ZnSe, В-слой PbTe), где в качестве резонансных слоев выбран PbTe. Положение максимума пропускания данного фильтра определяются, главным образом, оптической толщиной резонансных слоев. Так как для слоев PbTe оптическая толщина изменяется с  $g=2$  (при  $25^\circ\text{C}$ ) до  $g=2,11$  (при минус  $196^\circ\text{C}$ ), сдвиг полосы оказывается больше чем ширина области пропускания, что не позволяет использовать данный фильтр одновременно при  $25^\circ\text{C}$  и минус  $196^\circ\text{C}$ .

На рис. 4 приведена спектральная характеристика двойного узкополосного фильтра НВ2НВН В НВ2НВНН.



**Рисунок 3.**  
Фильтр узкополосный



**Рисунок 4.**  
Фильтр узкополосный

В качестве резонансных слоев выбран ZnSe. Несмотря на то, что оптическая толщина  $g$  резонансных слоев изменяется с  $g=2$  (при  $25^{\circ}\text{C}$ ) до  $g=1,94$  (при минус  $196^{\circ}\text{C}$ ), сдвиг центра полосы пропускания составил не более  $-0,04$  мкм при  $\lambda_{\text{центр}}=8$  мкм, что позволяет использовать данный фильтр как при  $25^{\circ}\text{C}$ , так и при минус  $196^{\circ}\text{C}$ .

Из приведенных результатов расчетов следует, что криогенные температуры оказывают значительное влияние на положение границ области блокировки отрезающих фильтров, центра пропускания узкополосных фильтров, что необходимо учитывать при разработке конструкций фильтров и условиях их эксплуатации.

#### Список литературы:

1. И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, А.В. Михайлов, В.П. Иванов, Г.И. Абзалова. *Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения.* – Казань: издательство «Фэн», 2003 – с 14-33.

## INFLUENCE OF CRYOGENIC TEMPERATURES ON THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF FILTER COATINGS BASED ON MATERIALS ARE MADE OF PbTe-ZnSe

**Koltsov A.Yu., Khasanov A.M.**

JSC «NPO «State Institute of Applied Optics»  
(JSC «NPO GIPO»), Kazan, Russia

The paper presents the results of calculations, which show a change of spectral characteristics of the four coating types based on material pairs are made of PbTe-ZnSe, as well as it demonstrates a possibility to compensate a displacement of spectral characteristics of narrow-band filter by matching the resonance layer.

# ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Батшев В.И.<sup>1,2</sup>, Мачихин А.С.<sup>2,3</sup>, Пожар В.Э.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
г. Москва, Россия

Перестраиваемые акустооптические (АО) фильтры являются одними из перспективных оптических спектральных элементов. Произвольная спектральная адресация в широком диапазоне (например, 400-800 нм), высокое пространственное (до 1000 разрешимых положений) и спектральное ( $\sim 1$  нм) разрешения, отсутствие подвижных элементов, малое время перестройки ( $< 1$  мс) и другие достоинства [1] обуславливают широкое использование АО видеоспектрометров при решении технических, медицинских и других задач [2, 3].

АО фильтры являются компактными программно-управляемыми устройствами, которые могут быть интегрированы в оптические схемы существующих приборов. Например, приборы для визуального наблюдения объектов и цифровой регистрации их изображений (световые микроскопы, эндоскопы и пр.) при дополнении таким спектральным модулем могут обеспечивать качественно новый уровень исследований, позволяя анализировать, помимо пространственных свойств объектов, также их спектральную структуру [4, 5].

Цель доклада – показать особенности габаритного и абберационного расчета оптических систем АО видеоспектрометров, с учетом оптических характеристик реальных АО фильтров.

В работе представлены подходы к описанию функциональной модели АО фильтра, учитывающей его присоединительные оптические характеристики: апертурные, спектральные, полевые и абберационные [6]. Приведены примеры расчета оптических систем АО видеоспектрометров.

## Список литературы:

1. V.I. Pustovoit, V.E. Pozhar, M.M. Mazur etc. *Double-AOTF spectral imaging system*. //Proc. SPIE, 2005. V. **5953**. P. 200-203.
2. T. Vo-Dihn, P. Kasli, B. Cullum. *Multi-spectral imaging for medical diagnostics*. // Proc. SPIE, 2002. V. 4615. P. 13-19.
3. M. Bouhifd, M. Whelan, M. Aprahamian. *Fluorescence imaging spectroscopy utilising acousto-optic tuneable filters*. // Proc. of SPIE, 2005. V. 5826. P. 185-193.
4. Мачихин А.С., Батшев В.И. *Оптическая система для сопряжения двойных акустооптических монохроматоров и окуляров наблюдательных приборов* // Приборы и техника эксперимента, 2014. № 6. С. 93-99.
5. V. Pozhar, A. Machihin, V. Batshev. *Compact AOTF-based videospectrometer for endoscopic medical research*. // Photonics and Lasers in Medicine, 2013. V. **2(2)**. P. 153–157.
6. Мачихин А.С., Пожар В.Э. *Пространственно-спектральные искажения изображения при дифракции обыкновенно поляризованного светового пучка на ультразвуковой волне*. // Квантовая электроника, 2015. Т. **45**. № 2. С. 161-165.



# ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АСФЕРИЗАЦИИ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ АСФЕРИК ШИРОКОУГОЛЬНЫХ-ПРОЕКЦИОННЫХ ОБЪЕКТИВОВ

Рожков О.В., Шамаев С.М., Ширанков А.Ф.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия

Предложен критерий выбора рациональных поверхностей асферизации, и расчет параметров асферик, на основе выражений для расчета абберации 3+5+7 порядков, с целью уменьшения итоговых аббераций проекционных объективов и сокращению количества поверхностей.

В настоящее время проекционные объективы широко и эффективно применяются для отображения информации в конференционных залах, развлекательных центрах, домашних кинотеатрах и т.д.

В патентной базе США и Европы существует множество различных проекционных объективов, эти многолинзовые объективы содержат большое количество компонентов (4 и более) и множество асферических поверхностей высокого (10 и более) порядка.

В процессе абберационного синтеза проекционного объектива, после получения конструктивных параметров оптической системы, в большинстве случаев предлагается ввести в оптическую систему асферические поверхности. Однако остается открытым вопрос о количестве асферизируемых поверхностей и рациональном выборе поверхностей для асферизации, а так же и расчет параметров асферик.

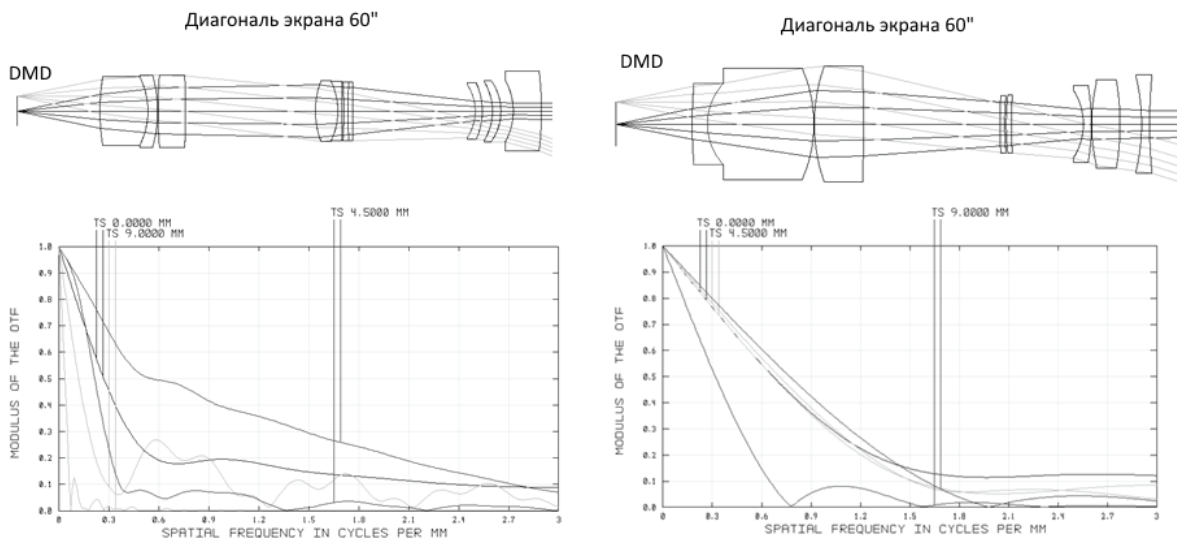
Наиболее широко встречающимся критерием для выбора поверхностей для сферизации является абберационная нагруженность оптического компонента. Для выявления данных поверхностей целесообразно использовать диаграммы аббераций такие как диаграмма Зейделя или диаграмма Цернике.

Формулы для расчета абберационных коэффициентов 3+5+7 порядков в базисе Зейделя приведенные в работе [1], для расчета абберационных коэффициентов Цернике или Чебышева приведены в работах [2]

На рис. 1 приведен пример выбора поверхности для асферизации слева: асферизация 2-ой и 5-ой поверхности, справа: асферизация 1-ой и 6-ой поверхности, как видно из приведенной схемы качество правого объектива существенно выше, что свидетельствует об важности оптимального выбора поверхностей для асферизации.

Теория и практика абберационных расчетов показывают, что реальные абберации светосильных проекционных объективов значительно отличаются от аббераций третьего порядка, поэтому абберационные диаграммы должны учитывать абберации 3+5+7го порядков.

Выражения, приведенные в работе [1], позволяют вычислить деформацию оптических поверхностей (стрелку прогиба). Расчет осуществляется решением СЛАУ сумм Зейделя для 3+5 или 3+5+7 порядков, где величины деформаций оптических поверхностей принимаются за неизвестные. Данная СЛАУ является в большинстве случаев переопределенной, так как количество асферизуемых поверхностей меньше числа абберационных коэффициентов. Величины абберационных коэффициентов предлагается брать равными нулю, а решение вести численными методами с помощью всевозможных решателей.



**Рисунок 1.**

Оптические схемы 2х проекционных объективов, ход лучей от DMD матрицы на экран

#### Список литературы:

1. О.В. Рожков, С.М. Шамаев. *Аналитическое разложение функции эйконала центрированных оптических систем*, Труды 9й Международной конференции «Прикладная оптика-2010». Санкт-Петербург 18-22 октября 2010. Том **1(2)**. Стр. 112-116. Оптическое приборостроение.
2. И.И. Пахомов, А.М. Хорохоров. *Использование полиномов Чебышева для синтеза и оптимизации оптических систем* // Вестник МГТУим. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1995. № 3. С. 69–73.

# **ГРАФОВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИННОВАЦИОННО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОТЕНЦИАЛА КРУПНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ (КПП) В ОБЛАСТИ ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

**Немтинов В.Б.\* , Патрикеев А.П.\*\* , Сериков В.Ю.\*\*\***

\*МГТУ им. Н.Э.Баумана, Россия

\*\*Холдинг «Швабе», Россия

\*\*\*АО «Лыткаринский завод оптического стекла»,  
г. Лыткарино, Московская обл.

Анализ инновационной научно-технической и затратной экономической деятельности в оптико-электронном приборостроении

Построен графовый маршрутный инноватор, идентифицирующий бинарную парадигму «затраты-выпуск» в рамках научно-технического (НТ) и затратного (Зтр) экономического инновационно-ориентированного потенциального поведения крупной промышленной системы.

## **Введение**

Создание новых продуктов, и прежде всего технических изделий, опирается на эволюцию научно-экономического знания. Для построения и использования инновационных технических устройств требуется понимание сути эволюционных технико-экономических процессов, чтобы принимать рациональные и обоснованные производственные научно-технические решения с помощью современных представлений о рыночной экономике [1]. Так как экономика неоднородна, то в зависимости от природы различий в изучаемом объекте и методов описания объекта в технико-экономической науке выделяют теоретическую и прикладную экономические ветви. Хотя подобное разделение до некоторой степени условно, оно отражает различия в изучаемых объектах и методах описания объектов и явлений.

## **Структурные схемы (СтрСх)**

В инженерно-экономической практике в связи с задачами перехода от топливно-сырьевой ориентации экономики к её инновационному потенциалу и необходимостью импортозамещения особое значение приобретают вопросы управления инновационно-ориентированным развитием крупных промышленных предприятий (КПП), имеющих потенциал для широкомасштабного производства продукции [2]. Так как не известно, что такое несистема, то в рамках системно-модельного подхода крупную промышленную систему (КПС) идентифицируют с помощью модели. Основной моделью КПС является технико-экономическая предметная модель в виде КПП, а его инновационно-ориентированное развитие является важнейшим фактором развития КПС. Вариации СтрСхем КПП детально исследованы в работе [2]. В ней показано, что технологическое отставание КПП от зарубежных конкурентов связано с тем, что предприятия не имеют достаточного притока инноваций, и самое главное научной поддержки. С этой целью проводится поиск графовой модели экономического роста и создаётся научная платформа КПП.

На рис. 1 приведён графовый маршрутный инноватор в виде ансамбля полных графов, задающих научно-техническое и затратное модельное поведение КПС. Он представляет собой геометрическое расширение СтрСх, определяющее бинарную парадигму «затраты-выпуск». Парадигма характеризует возможности построения и использования ОЭП на основе инновационно-ориентированного потенциала КПП и визуализирует совокупную способность КПП осуществлять производственную научно-техническую и экономическую деятельность, т.е. выпускать конкурентную серийную продукцию. В структурной теории графы задают отношения на частях парадигмы в виде научно-технических концепт-факторных маршрутов различной арности, связывающих этапы построения и использования ОЭП, идентифицируя их как этапно-модельные вершины, эквивалентные в смысле технико-экономической значимости.

Нобелевский лауреат 1973 г., экономист с мировым именем, русский американец В.В.Леонтьев создал способ макроэкономического анализа в виде метода «затраты-выпуск». Этот метод естественным образом вписывается в оболочку методологии этапно-модельного синтеза КПС, используемого в структурной теории. Применение бинарного отношения «затраты-выпуск» на современном уровне построения и использования качественного технического изделия является важнейшим инструментом не только прогнозирования выходных этапных технико-экономических параметров и характеристик, но и научно обоснованного и потому оптимального графового планирования в процессе построения и использования нового изделия.

Экономика обеспечивает КПП объективной информацией, необходимой для принятия эффективных инновационных решений на основе принципиально новых матрично-графовых технико-экономических моделей [2]. Для этого необходимо создание нового технико-экономического научного направления в рамках научной проектно-технической инженерии [3], как раздела прикладной инженерной экономики [1].

### Показатели качества

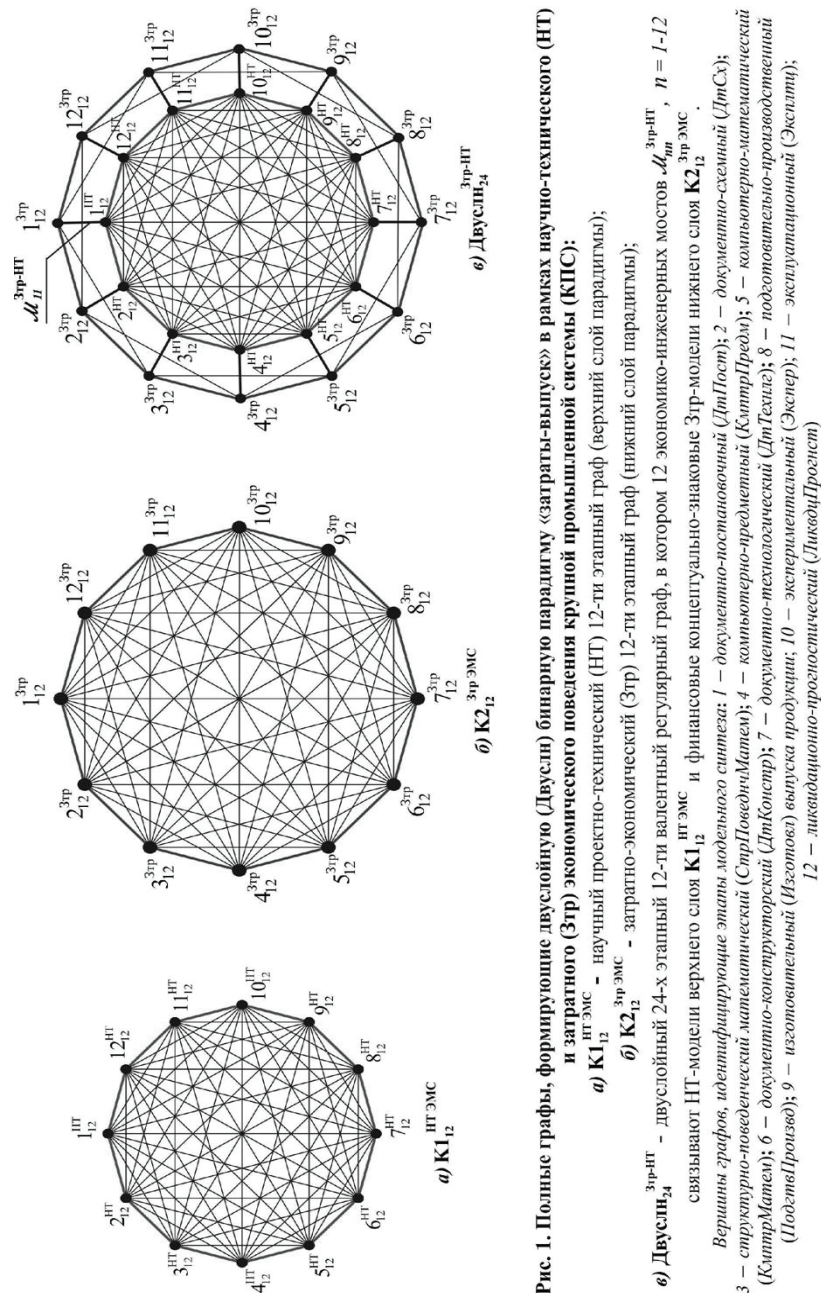
Качество экономических решений связано с затратами производства. Его оценка опирается на производственный опыт и критерии качества экономической деятельности, так как устойчивое производство не возможно без устойчивого прогностического развития. В рамках структурной теории критерии качества К любой технико-экономической системы – это отношения различной арности на модельных множествах. Например, это бинарная связь совершенной конкуренции и идеального рынка или связь инвестиций с экономической эффективностью [1-2].

На основе графов из рис. 1 вводятся три принципиально новых количественных критерия графовой связности, холистичности и эмерджентности синтезируемой КПС. Критерий рёберной связности определяется как отношение количества рёбер, например НТ-проектной орцепи в графе К1 (этапы 1 – 7), к полному числу рёбер Зтр-проектной орцепи в графе К2 (этапы 1 – 12). Это технико-экономический аналог отношения сигнал/помеха, так что в ДвуслнГрф  $K_{свз} = 7/12$ . Критерий графовой холистичности (целостности) КПС определяется числом графовых компонент связности, которые зависят от наличия мостов. Для графов К1 и К2 критерий  $K_{холст} = 1$ , а для ДвуслнГрф критерий  $K_{холст} = 2$ . Критерий графовой эмерджентности КПС, задающей новые связи, которые не присущи исходной орцепи, определяется числом связей различной арности. Для графов К1 и К2 критерий  $K_{эмердж} = 1$ , а для ДвуслнГрф критерий  $K_{эмердж} = 12$ .

**Объем инвестиций** определяется суммой затрат инновационного маршрута.

## Заключение

Построена бинарная парадигма «затраты-выпуск» в рамках исследования НТ и Зтр экономического поведения КПС.



**Рис. 1. Полные графы, формирующие двуслойную (Двуслн) бинарную парадигму «затраты-выпуск» в рамках научно-технического (НТ) и затратного (Зтр) экономического поведения крупной промышленной системы (КПС):**  
**а)  $K1_{НТЭМС}$**  – научный проектно-технический (НТ) 12-ти этапный граф (верхний слой парадигмы);  
**б)  $K2_{ЗтрЭМС}$**  – затратно-экономический (Зтр) 12-ти этапный граф (нижний слой парадигмы);  
**в)  $K3_{ЗтрЭМС}$**  – двуслойный 24-х этапный 12-ти валентный регулярный граф, в котором 12 экономико-инженерных мостов  $\mathcal{M}_{нр}^{Зтр-НТ}$ ,  $n = 1-12$  связывают НТ-модели верхнего слоя  $K1_{НТЭМС}$  и финансовые концептуально-знаковые Зтр-модели нижнего слоя  $K2_{ЗтрЭМС}$ .

*Вершины графов, идентифицирующие этапы модельного синтеза: 1 – документно-постановочный (ДпПост); 2 – документно-схемный (ДпСх); 3 – структурно-поведенческий математический (СтрПоведчМатем); 4 – компьютерно-предметный (КомпПрем); 5 – компьютерно-математический (КомпМатем); 6 – документно-конструкторский (ДпКонстр); 7 – документно-технологический (ДпТехнол); 8 – подготовительно-производственный (ПодетвПроизв); 9 – изготовительный (Изготел) выпуска продукции; 10 – экспериментальный (Экспер); 11 – эксплуатационный (Эксплти); 12 – ликвидационно-прогностический (ЛиквдПрогст).*

## Список литературы:

1. *Инженерная экономика: Учеб* / В.В.Кочетов, А.А.Колобов, И.Н.Омельченко. Под ред. А.А.Колобова, А.И.Орлова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 668с.
2. А.П.Патрикеев. Кандидатская диссертация на тему «Управление инновационно-ориентированным развитием КПП», 2009. – 194с.
3. В.Б. Немтинов, В.Ю. Сериков В.Ю. *Контентант*, **14**, №2. с. 3-19, (2015).



# СПОСОБ РАСЧЁТА КОМПАКТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОЛУЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЁННОСТИ

Дружин В.В., Степанов В.П., Галихайдаров А.Е.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия  
Оптико-электронные приборы и системы

Исследованы теоретические вопросы расчета и рассмотрены математические методы определения формы поверхностей оптических элементов для получения равномерных распределений освещённости в круглых или прямоугольных областях. Разработано программное обеспечение для расчета и визуализации преломляющих оптических поверхностей.

В настоящее время наблюдается бурный переход от традиционных источников излучения (лампы накаливания) на новые источники. Широкое распространение получают светотехнические устройства на основе светодиодных источников излучения. Эти источники излучают некогерентный свет при пропускании через полупроводник электрического тока. Применение светодиодных источников связано с расширением спектрального диапазона излучения и увеличением светового потока. Светодиодные источники имеют высокую надёжность, длительный срок службы, высокий КПД и низкое удельное энергопотребление. Светодиоды имеют малый вес и малые размеры активной излучающей части, называемой «кристаллом» или «чипом». Так, например, мощные светодиоды могут достигать значения уровня светового потока 1483Лм при габаритных размерах светодиода 3,45 x 3,45 мм [1].

В работе [2] описан способ решения задачи получения равномерного распределения освещённости, за счёт использования оптического элемента, содержащего преломляющие и отражающие поверхности. Конус пучка лучей, идущих от точечного источника, разделяется на центральную часть и периферию. Центральная часть пучка испытывает преломление на соответствующей центральной части первой преломляющей поверхности оптического элемента, а излучение внешней части пучка после преломления на второй, внешней части преломляющей поверхности оптического элемента, испытывает полное внутреннее отражение на отражающей поверхности оптического элемента.

В работе [3] описан способ получения равномерной освещённости с помощью поверхности свободной формы, так называемой free-form поверхности, описываемой либо совокупностью нормалей к поверхности, либо полиномом. Перераспределение энергии в плоскости анализа происходит за счёт особой формы асферической поверхности.

В указанных способах в качестве источника излучения принят точечный источник. Однако, при переходе от точечного источника к источнику конечных размеров теряется равномерность распределения освещённости в плоскости анализа.

Поэтому эти методы удобно использовать в качестве начальных приближений и



в дальнейшем использовать методы оптимизации поверхности до получения заданного уровня равномерности освещенности в плоскости анализа.

Для реализации первого метода расчёта авторами выбран язык native C++, т.к. он поддерживает объектно-ориентированную парадигму программирования, что облегчает создание сложных структур данных. В качестве среды разработки была выбрана среда Visual Studio, позволяющая создавать графические программы для операционной системы Windows.

Разработанный алгоритм визуализации использует два шейдера: вершинный и фрагментный. Шейдер – программа для процессора графической карты, управляющая поведением шейдерной стадии графического конвейера и занимающаяся обработкой соответствующих входных данных. В программе шейдеры реализованы как простые функции, а не отдельные подпрограммы, так как программа производит вычисления только на центральном процессорном устройстве.

Диаграмма классов программы расчета преломляющих поверхностей представлена на рис. 1. В процессе реализации алгоритма расчета оптических элементов появилась необходимость использования дополнительного функционала: линейная интерполяция, её реализует класс Newton на диаграмме, простейшие математические функции класса, реализованы в классе MathBase, и методы триангуляции, реализованные в классе Triangulation.

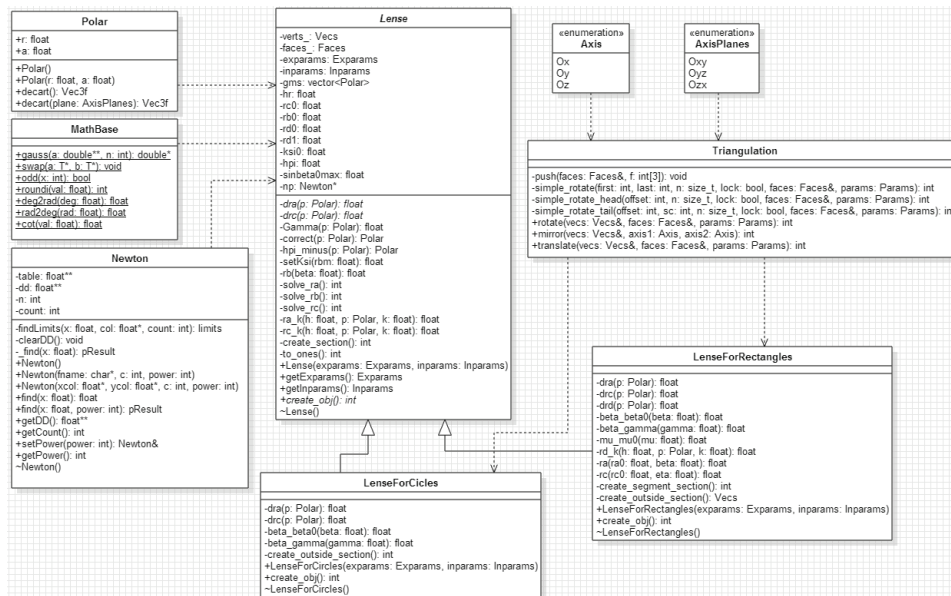


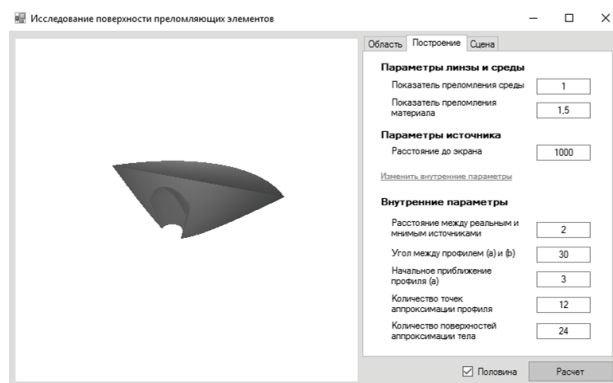
Рисунок 1.

Диаграмма классов для расчета оптических элементов

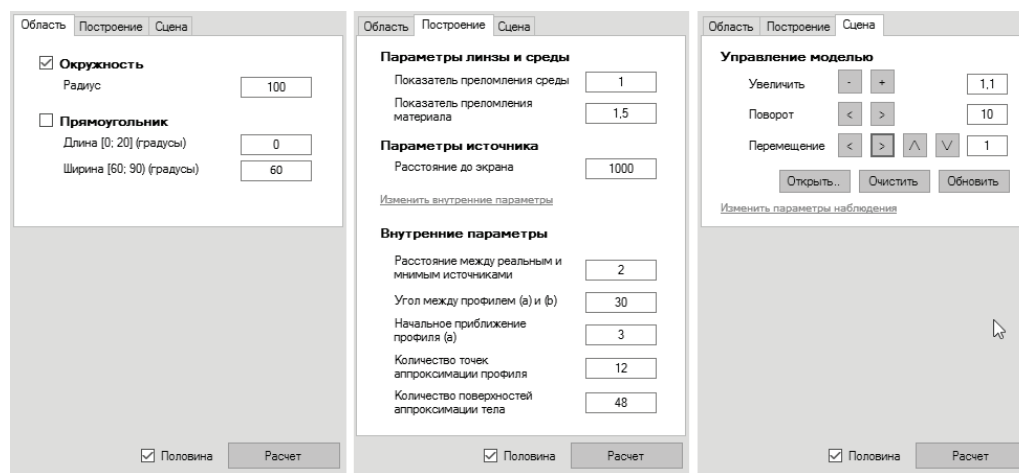
Пользовательский интерфейс разработан с помощью дизайнера форм MS Visual Studio. После запуска программы на экран монитора пользователя выводится окно программы (рис. 2), предоставляющее пользователю выбор и настройку параметров расчета и визуализации преломляющих поверхностей. Пользователю предоставляется возможность предварительно, последовательным нажатием кнопок, выбрать и установить параметры оптического элемента. В окне программы содержится три вкладки, позволяющие изменять параметры области, построения и сцены, т.е. параметры визуализации.

Содержание вкладок показано на рис. 3. По окончании расчета в папке с программой будет сформирован файл с расширением .obj, содержащий трехмерную модель рассчитанной преломляющей поверхности.

Исследованы теоретические вопросы расчета оптических элементов для формирования равномерного распределения, содержащих преломляющие и отражающие поверхности: рассмотрены имеющиеся математические методы расчета оптических элементов, позволяющие определить подлежащие реализации основные функции программы. Авторами проведены эксперименты с целью проверки работоспособности программы. Проводится исследование визуальных характеристик оптических элементов при различных параметрах построения и при различных размерах формируемых областей, проводится анализ результатов с помощью оптических САПР Zemax и Light Tools.



**Рисунок 2.**  
Основное окно разработанной программы



**Рисунок 3.**  
Содержание вкладки «Область»

В результате работы авторами разработано программное обеспечение, позволяющее одновременно проводить расчет оптических элементов для формирования распределений освещенности в круглых и прямоугольных областях, а также удобно работать с трехмерной моделью рассчитанного оптического элемента. В дальнейшем планируется дополнить программу расчетом поверхностей, заданных в виде полиномов и добавить функцию оптимизации формы поверхности оптического элемента.

### Список литературы:

1. <http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XHP35-HI>.
2. Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев, *Оптический журнал*, Т. 76, № 7, С.70-76 (2009).
3. Yi Ding, Xu Liu, Zhen-rong Zheng, and Pei-fu Gu, *Opt. Express*, **16**, 12958-12966 (2008).

## DESIGN OF OPTICAL ELEMENTS FOR LEDS WITH UNIFORM ILLUMINATION

**Druzhin V.V., Stepanov V.P., Galihaydarov A.E.**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Methods of design and determining the form of compact optical elements to obtain uniform illumination in round or rectangular areas were considered. Software tool for the calculation and visualization of refracting optical surfaces was developed.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОВОЗВРАЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ИК ДИАПАЗОНА

**Степанов Р.О., Лебедев В.А.**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия  
Оптико-электронные приборы и системы

Разработана экспериментальная установка для измерения световозвращательных характеристик оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в ИК диапазоне спектра. Предложена структурная схема и обоснована элементная база данной установки. Выполнен теоретический анализ погрешности измерения показателя световозвращения (ПСВ) ИК ОЭС.

### Введение

В последнее время широкое практическое применение в различных областях техники находят ОЭС, работающие в ИК диапазоне. В частности, такие ОЭС могут использоваться для ведения несанкционированного наблюдения за различными объектами. В этой связи вопрос возможности обнаружения их скрытой работы представляет интерес как для разработчиков самих ОЭС, так и для создателей систем противодействия этим ОЭС. Как правило, задача дистанционного обнаружения наблюдательных ОЭС решается

методами оптической локации, суть которой заключается в получении информации о замаскированной ОЭС по параметрам ретроотраженного от нее лазерного излучения. При этом способность ОЭС ретроотражать зондирующее лазерное излучение характеризуется световозвратательными характеристиками. Определяющей световозвратательной характеристикой является ПСВ), который показывает, как переизлучает область зрачка единичной площади в пределах единичного телесного угла. Наличие информации о величине ПСВ ОЭС является основой для прогнозирования скрытности его работы.

Для лабораторного определения ПСВ ИК ОЭС авторами разработана экспериментальная установка для измерения световозвратательных характеристик в спектральных диапазонах 3...5 и 8...14 мкм.

### Структурная схема

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема экспериментальной установки, обеспечивающей измерение ПСВ относительным способом, путем сравнения фотометрических характеристик ретроотраженного излучения от исследуемой ИК ОЭС и эталонного световозвратателя при неизменных условиях подсвета.

В данной установке используется 3 лазерных источника излучения:

- Лазер ДлИК диапазона – газоразрядный  $\text{CO}_2$  лазер,  $\lambda = 10,6$  мкм;
- Лазер СрИК диапазона – лазер Argies на гетероструктурах,  $\lambda = 4$  мкм;
- Видимый лазер – используется для юстировки всех элементов стенда.

Для высокоточного сопряжения осей рабочих лазеров с осью опорного видимого лазера и уменьшения габаритов стенда используются 2 плоских вбрасываемых зеркала, закрепленных на платформе модуля линейного перемещения СТМ-2. Перемещение данного модуля управляется при помощи высокоточного шагового двигателя СПШ-20.

После прохождения устройства сопряжения осей излучение выбранного лазерного источника проходит через систему из 2-х зеркал (31 – сферическое и 32 – асферическое), которые совместно образуют внеосевую телескопическую систему. Данная система зеркал используется для расширения диаметра лазерного пучка до 100 мм для измерения различных типов ИК ОЭС.

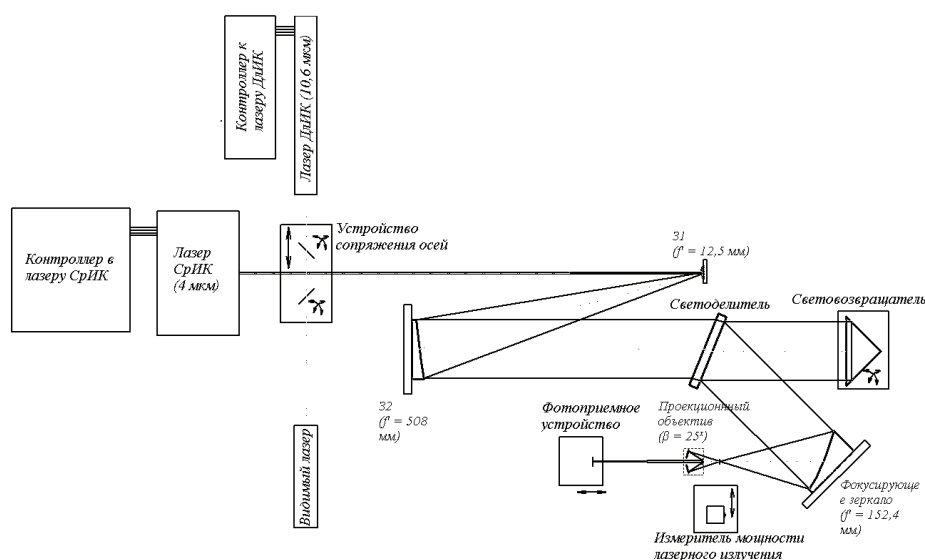


Рисунок 1.

Структурно-функциональная схема экспериментальной установки

После прохождения системы расширения пуска лазерное излучение попадает в узел световозвращения. Данная установка построена по известной методике относительных измерений [1,2], поэтому в ней предусмотрена как возможность установки исследуемых ОЭС различных конструкций, так и установки и точной настройки эталонного световозвращателя.

Узел светоделителя предназначен для разделения излучения зондирующего и ретроотраженного пучков. После отражения от светоделительного элемента ретроотраженное излучение с помощью фокусирующего параболического внеосевого зеркала и зеркального проекционного объектива собирается на фотоприемнике. Проекционный объектив введен в систему для оптимального согласования размеров матрицы фотоприемного устройства и изображения индикатрисы ретроотражения.

В качестве фотоприемника выбран неохлаждаемый матричный микроболومتر, входное окно которого позволяет работать одновременно в двух требуемых диапазонах спектра (3...5 и 8...14 мкм).

Выбранные фотоприемник и оптические элементы формируют изображение индикатрисы ретроотражения с угловым разрешением 3 угл. сек.

### Показатели качества

Для вычисления погрешности измерения ПСВ проведем анализ выражения для вычисления ПСВ, основанного на предложенной методике относительных измерений

$$R_{иссл.}(\Omega_{изм.}) = \frac{\Phi_{иссл.}}{\Phi_{эт.}} \cdot \frac{\sum_{\Omega_{изм.}} \Phi_i^{иссл.}}{\sum_{\Omega_{иссл.}} \Phi_i^{иссл.}} \cdot \frac{\Omega_{эт.}}{\Omega_{изм.}} \cdot R_{эт.}(\Omega_{эт.}) = \frac{\Phi_{иссл.}}{\Phi_{эт.}} \cdot \frac{\sum_{\Omega_{изм.}} \Phi_i^{иссл.}}{\sum_{\Omega_{иссл.}} \Phi_i^{иссл.}} \cdot \frac{1}{\Omega_{изм.}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho_{ни} \quad (1)$$

где  $\Phi_{иссл.}$  – величина потока излучения, измеряемая одноплощадочным приемником излучения в максимальном угле усреднения, в котором распространяется все излучение ретроотраженное от исследуемого Свз;

$\Phi_{эт.}$  – величина потока излучения, измеряемая одноплощадочным приемником излучения в максимальном угле усреднения, в котором распространяется все излучение ретроотраженное от эталонного Свз;

$\Phi_i^{иссл.}$  – величина потока ретроотраженного излучения от исследуемого Свз, попадающего на  $i$ -ый пиксель матричного приемника излучения;

$\Omega_{изм.}$  – величина телесного угла усреднения, в котором проводится измерение ПСВ исследуемого Свз;

$D$  – диаметр входного зрачка эталонного Свз;

$\rho_{ни}$  – коэффициент отражения эталонного Свз.

Искомую величину относительной погрешности ПСВ можно описать, применив к (1) известное правило определения погрешности косвенно измеряемой величины через частные производные по ее составляющим [3]:

$$\delta R_{иссл.} = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial \Phi_{иссл.}} \cdot \Delta \Phi_{иссл.}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial \Phi_{эт.}} \cdot \Delta \Phi_{эт.}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial \sum_{m_{изм.}} \Phi_i^{иссл.}} \cdot \Delta \sum_{m_{изм.}} \Phi_i^{иссл.}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial \sum_{m_{иссл.}} \Phi_i^{иссл.}} \cdot \Delta \sum_{m_{иссл.}} \Phi_i^{иссл.}\right)^2}}{R_{иссл.}} + \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial f'} \cdot \Delta f'\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{иссл.}}{\partial D} \cdot \Delta D\right)^2}}{R_{иссл.}} \quad (2)$$

где  $\Delta\Phi_{\text{иссл}}, \Delta\Phi_{\text{эт}}, \Delta\sum_{m_{\text{изм}}} \Phi_i^{\text{иссл}}, \Delta\sum_{m_{\text{иссл}}} \Phi_i^{\text{иссл}}, \Delta f', \Delta\beta, \Delta D$  – абсолютные погрешности измерения потока излучения отраженного от исследуемого и эталонного Свз, суммарного потока от исследуемого Свз, измеряемого в выбранном и полном углах усреднения, фокусного расстояния приемного коллиматора, линейного увеличения проекционного объектива и диаметра входного зрачка эталонного Свз соответственно.

Из анализа выражения (2) следует, что максимальная относительная погрешность не превышает 10.5% при измерении ПСВ ОЭС, лежащих в диапазоне от 10 до  $10^5$  м<sup>2</sup>/ср.

### Заключение

Разработан технический облик установки для измерения световозвращательных характеристик ИК ОЭС. Данная установка позволяет получать двумерное изображение индикатрисы ретроотражение ИК ОЭС с шагом в 3 угл. сек., а также определять их ПСВ в диапазоне от 10 до  $10^5$  м<sup>2</sup>/ср с погрешностью не превышающей 10,5%. Полученные результаты представляют интерес как для разработчиков ИК ОЭС, предназначенных для ведения скрытого визирования, так и для создателей лазерных локационных систем обнаружения таких ОЭС.

### Список литературы:

1. И.В. Животовский. *Разработка и исследование лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик оптико-электронных приборов*, 1, с. 473, (2005).
2. Р.О. Степанов, Н.В. Барышников. *Измерительная техника*, 1, №9. с. 24-28, (2007).
3. Л.Н. Брянский, А.С. Дойников. *Краткий справочник метролога*, 1, с. 79, (1991).

## EXPERIMENTAL SETUP TO MEASURING THE RETRO-REFLECTIVE CHARACTERISTICS OF OPTOELECTRONIC SYSTEM IN IR RANGE

Stepanov R.O., Lebedev V.A

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Experimental setup to measure the retro-reflective characteristics of optoelectronic systems operating in IR ranges was developed. Structural scheme and element base this setup was offered. Theoretical analysis of measuring accuracy retroreflexion index of IR device was performed.



## ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ

**Носов П.А.\*, Павлов В.Ю.\*, Раевский Е.В.\*\*, Сычкова Е.В.\*,\*\*,  
Хорохоров А.М.\*, Ширанков А.Ф.\***

\*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия

\*\* ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», г. Москва, Россия

В работе рассмотрены способы построения оптических систем и проблемы формирования лазерного излучения для технологических процессов обработки материалов.

Созданные в последнее время источники лазерного излучения и полученные знания о взаимодействии лазерного излучения с различными материалами привели к широкому применению лазеров в различных областях [1-3]. Сегодня по праву лазер относится к одной из главных технических инноваций XX века.

Для реализации современных лазерных технологий используют различные типы лазеров (твердотельные, газовые, полупроводниковые и др.). В последнее время активно развиваются лазеры с полупроводниковой накачкой, в т.ч. волоконные и дисковые [1]. Обзор отечественных и зарубежных лазерных технологических установок показал недостаточное понимание важной роли их оптического блока. Повышение производительности и технических характеристик технологических установок зачастую сводится лишь к увеличению мощности лазера и применению различных кинематических схем. Помимо роста стоимости, при увеличении мощности лазера ухудшается качество его излучения. В результате увеличивается энергопотребление и уменьшается КПД оборудования.

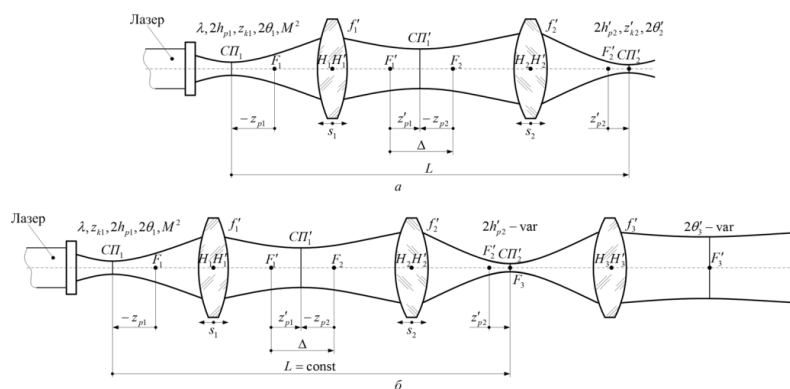
Во всех лазерных технологиях (т.е. везде, где инструментом является лазерное излучение) лазерная оптическая система наряду с лазером – основные блоки, определяющие параметры данной технологии.

При обработке материалов необходимо в рабочей зоне обеспечить требуемую плотность мощности лазерного излучения. Лучевая стойкость оптических элементов лазера, возникновение различных нелинейных эффектов и др. ограничивают максимальную выходную плотность мощности излучения. При этом мощные волоконные лазеры формируют расходящийся пучок. Для большинства технологических процессов, связанных с обработкой материалов, такие значения плотности мощности оказываются недостаточными. Поэтому при использовании лазерного излучения в технологических целях, как правило, возникает необходимость его фокусировки.

В зависимости от практической задачи для формирования в рабочей зоне требуемых пространственных параметров лазерного пучка используют лазерные оптические системы различного типа – фокусирующие, согласующие или коллимирующие. Для дальнейшего расширения областей применения лазерных приборов и оборудования разработан новый класс оптических систем с переменными параметрами – лазерные вариосистемы. Такая панкратическая или вариоптика отличается универсальностью, заменяет набор оптических насадок и снижает стоимость лазерной системы. Лазерные вариосистемы обеспечивают плавное изменение параметров выходного пучка – формирование выход-

ной перетяжки лазерного пучка переменного диаметра в плоскости обработки материала или перемещение в пространстве перетяжки малого размера (см. рис.) [4,5]. На рис. использованы следующие обозначения:  $2h_p, z_k, 2\theta$  и  $2h'_p, z'_k, 2\theta'$  – диаметр перетяжки, параметр конфокальности и угловая расходимость пучка на входе и выходе оптической системы;  $M^2$  – параметр качества лазерного пучка;  $z_{p1}$  – положение сечения перетяжки входного пучка относительно переднего фокуса  $F_1$  первого компонента;  $z'_{p2}$  – положение перетяжки выходного пучка относительно заднего фокуса  $F_2'$  второго компонента;  $\Delta$  – расстояние между  $F_1'$  и  $F_2'$ ;  $f'_k$  – фокусное расстояние k-го компонента вариосистемы;  $L$  – длина лазерной вариосистемы;  $s_2$  ( $s_1$ ) – закон перемещения компонентов лазерной вариосистемы.

Лазерная вариосистема – основа аддитивных технологий. На её основе строится 3D лазерный принтер для выращивания деталей с изменением материала по их высоте. Это позволяет сочетать в разных сечениях одной детали уникальные несочетаемые обычно свойства – гибкости, твердости и износостойкости.



**Рисунок 1.**

Схемы лазерных вариосистем различного назначения:

а – изменение диаметра выходной перетяжки в фиксированной плоскости обработки материала; б – изменение угловой расходимости пучка

Принципиально важно то, что при разработке лазерной оптики, обладающей высокой эффективностью, необходимо учитывать свойства лазерного источника [6-8]. Кроме того, для ряда технологических задач предъявляют особые требования к разрабатываемому для их решения оборудованию. Например, при использовании мощного лазера необходимо обеспечить лучевую стойкость элементов оптической системы.

Таким образом, имеют место ряд проблем и нерешенных задач:

- нагрев оптических элементов при формировании мощного лазерного излучения;
- способы охлаждения оптических элементов лазерных технологических головок;
- лучевая стойкость оптических элементов лазерного оборудования, увеличение их срока службы;
- тип и структура лазерной оптической системы, рациональное количество оптических элементов;
- расположение, параметры и количество защитных стёкол;
- обеспечение условий и правил сборки лазерной оптики.

Перспективным направлением развития лазерных приборов и систем на базе твердотельных лазеров является разработка оптических систем, позволяющих осуществлять плавное изменение пространственных параметров лазерного пучка в рабочей зоне в широких пределах: диаметра перетяжки, её положения, конфокального параметра, угловой

расходимости. Такие оптические системы будут востребованы для решения таких задач, как космические оптические линии связи, лазерные оптико-электронные приборы специального назначения и др.

При традиционном подходе к изменению пространственных параметров выходного пучка в широких пределах используют внешнюю (вне резонатора лазера) оптическую систему с большим перепадом увеличения (~50 и более крат). Такая оптическая система, удовлетворяющая всем требованиям (габаритным, оптическим, конструкторско-технологическим), имеет сложную структуру.

Упростить оптический блок лазерных систем с большим перепадом увеличения можно за счет перераспределения требуемого перепада увеличения на оптическую систему резонатора и внешнюю (вне резонатора лазера) оптическую систему.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана научные направления «Разработка вариосистем» и «Лазерная оптика» успешно работают более 40 лет. Расчет оптических систем базируется на разработке и применении различных математических моделей, начиная со структурно-габаритного синтеза, абберационного синтеза и заканчивая автоматизированным расчетом допусков, включая их перебалансировку при учете технологических возможностей конкретного изготовителя оптики. Процесс разработки лазерных приборов и оборудования отличается комплексностью: создается не только рабочая конструкторская документация на оптику и механику, изготавливается макетный образец, но и разрабатывается программа и методика его контроля и испытаний. Таким образом, разработанные системы отличаются достижением либо теоретически предельных, либо близких к ним параметров и характеристик.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Президента РФ № МК-6960.2016.8.*

#### **Список литературы:**

1. А.Г. Григорьянц, В.В. Васильцов, *Инженерный журнал: наука и инновации*, №6, (2012).
2. Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин. *Практика прецизионной лазерной обработки*. М.: Техносфера, 696 с., (2013).
3. Е.Д. Вакс, И.Ф. Лебёдкин, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин, А.В. Толокнов. *Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров*. М.: Техносфера, 356 с., (2015).
4. Патент 2488861 РФ: *Способ изменения диаметра перетяжки выходного лазерного пучка на фиксированном расстоянии от лазера*.
5. Патент 2411598 РФ: *Способ и устройство для перемещения перетяжки лазерного пучка*.
6. И.И. Пахомов, А.Б. Цибуля. *Расчет оптических систем лазерных приборов*. М.: Радио и связь, 152 с., (1986).
7. А.Г. Аниканов, И.И. Пахомов, А.Ф. Ширанков, *Оптический журнал*, 77, №2, с.30-36, (2010).
8. А.Ф. Ширанков, П.А. Носов, А.Г. Григорьянц, Р.С. Третьяков, П.Е. Самарин, *Наукоемкие технологии в машиностроении*, №5, с.37-48, (2014).

### **OPTICAL SYSTEMS FOR MODERN LASER TECHNOLOGY AND EQUIPMENT USING COMPOSITE MATERIALS**

**Nosov P.A.\*, Pavlov V.Yu.\*, Raevsky E.V.\*\*\*, Sychkova E.V.\*,\*\*, Khorokhorov A.M.\*, Shirankov A.F.\***

\* Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

\*\* Lasers & apparatus TM, Moscow, Russia

Ways of building optical systems and problems of formation of laser radiation for material processing are considered.

# ЛАЗЕРНЫЙ ФЛУОРОМЕТР ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Федотов Ю.В., Булло О.А., Белов М.Л., Городничев В.А.

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Описан технический облик и основные параметры передающей и приемной систем лазерного флуориметра для контроля состояния растений. Определены наиболее перспективные лазерные длины волн возбуждения и спектральные диапазоны регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения. Описан алгоритм обработки данных измерений.

## Введение

Наиболее перспективным дистанционным методом контроля состояния растительности является лазерный флуоресцентный метод (см., например, работы [1-3]).

Дистанционные лазерные методы могут использоваться независимо от времени суток и обладают высокой пространственной разрешающей способностью (из-за небольшой расходимости лазерного пучка).

## Структурная схема

Структурная схема лазерной системы для контроля состояния растений содержит четыре основных блока: блок излучателя – лазер (с длиной волны в видимом или ультрафиолетовом диапазоне); блок передающей оптической системы для формирования необходимой расходимости излучения (определяемой требуемым пространственным разрешением на земной поверхности); приемный блок, включающий приемную оптическую систему, спектральные фильтры (обеспечивающие выбор нескольких спектральных каналов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения), фотоприемники (фотоэлектронные умножители); блок поворотного устройства приемо-передатчика лазерного флуориметра, обеспечивающий необходимое пространственное сканирование подстилающей земной поверхности поперек направления полета авиационного носителя; блок обработки, выдачи и хранения данных измерений (при дистанционных самолетных измерениях в блоке осуществляется составление карты состояния растений по трассе полета); блок управления лазерного флуориметра.

Лазерная система предназначена для оперативного дистанционного (например, с авиационного носителя для контроля сельскохозяйственных посадок, лесов и т.п.) или неконтактного (в теплицах) контроля состояния растений путем обнаружения стрессовых состояний растительности. Лазер с длиной волны в видимом или ультрафиолетовом диапазоне облучает исследуемый участок земной поверхности (или растения в теплицах) и возбуждает флуоресцентное излучение.

В случае дистанционных самолетных измерений схема зондирования - моностабильная коаксиальная с совмещенными оптическими осями источника и приемника излучения.

## Показатели качества

Анализ спектров флуоресценции здоровой растительности и растительности в различных стрессовых состояниях при разных длинах волн возбуждения показывает, что наиболее ярко выраженные и наиболее устойчивые изменения в спектре флуоресценции растений (вызванных стрессом растений различной природы) происходят при длинах волн возбуждения в зеленой (например, на длине волны 532 нм - второй гармонике лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима) или сине-зеленой областях спектра.

Твердотельный лазер на длине волны 532 нм имеет преимущество (при разработке аппаратуры для дистанционного зондирования) как перед азотным лазером на 337 нм, так и перед лазером на 355 нм (третья гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате имеет меньшую энергию в импульсе, чем вторая). Длина волны возбуждения 532 нм характеризуется также большой эффективностью возбуждения флуоресценции.

В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции растительности наиболее перспективно использовать твердотельный импульсный лазер на иттрий-алюминиевом гранате с диодной накачкой и с удвоением частоты. Частота повторения лазера определяется спецификой решаемой задачи (и скоростью полета авиационного носителя) и варьируется от единиц килогерц до сотен или десятков герц, мощность в импульсе – сотни киловатт и единицы мегаватт, длительность импульса – единицы и десятки наносекунд.

Лазерный флуориметр для дистанционных измерений наиболее перспективно устанавливать на борту авиационного носителя. Максимальная высота полета (для регистрации флуоресцентного излучения растительности) ~ 150 - 200 м. Угловое сканирование (поперек направления полета носителя) позволяет проводить зондирование в широкой полосе обзора на земной поверхности. Размер лазерного пятна подсвета на земной поверхности ~ 1 – 2 м.

Приемный канал регистрирует флуоресцентное излучение исследуемой поверхности. Особенностью приемного блока является регистрация флуоресцентного излучения в двух или трех узких спектральных диапазонах (с центральными длинами волн около 680, 710 и 740 нм), специально выбранных для обнаружения стрессовых состояний растительности. Диаметр приемного телескопа (телескоп Кассегрена) – от 10 до 20 см. Излучение флуоресценции собирается приемным объективом и вводится в оптическое волокно. Волокно обеспечивает простоту согласования приёмного телескопа с приемником - при такой конструкции положение ФЭУ не будет зависеть от положения приемной системы. Разделение длин волн после приемного телескопа проводится с помощью дихроических зеркал.

Блок обработки лазерного флуориметра содержит персональный компьютер со специальным программным обеспечением, обеспечивающим возможность стрессовых состояний растительного покрова с высокой надежностью.

## Заключение

Лазерный флуориметр позволяет эффективно (с большой надежностью) проводить дистанционный оперативный контроль состояния растительности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект 1965/14).



### Список литературы:

1. В.С. Лысенков, Т.В. Вардуни, В.Г. Сойер, В.П. Краснов, *Фундаментальные исследования*, №4, с. 112-119, (2013).
2. A.S. Gouveia-Neto, E.A. da Silva, P.C. Cunha, R.A. Oliveira-Filho, L.M.H. Silva, E.B. da Costa, T.J.R. Câmara, L.G. Willadino, *Proc. SPIE*, 7568, pp. 75680G-1 - 75680G-8, (2010).
3. J. Belasque, M.C.G. Gasparoto, L.G. Marcassa, *Applied Optics*, 47, № 11, pp. 1922-1926, (2008).

## LASER FLUOROMETER FOR REMOTE SENSING OF VEGETATION

**IFedotov Yu.V., Bullo O.A., Belov M.L., Gorodnichev V.A.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Main characteristics of transmitting and receiver systems of laser fluorometer for problem of vegetation monitoring is considered. Particularly promising excitation laser wavelengths and recording spectral bands of laser-induced fluorescence radiation are defined. Processing algorithm of measured data is presented.

## ЛАЗЕРНЫЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

**Булло О.А., Федотов Ю.В., Белов М.Л., Городничев В.А.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Проведены экспериментальные исследования лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений. Показано, что наиболее перспективными являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм. Установлено, воздействие стрессовых факторов, проявляется в устойчивых изменениях формы спектра флуоресценции.

### Введение

Болезни растений, недостаток влаги и питательных веществ, наличие различных загрязнителей в грунте и т.п. приводят к невозможности нормального роста растительности (стрессовым состояниям растений). Стрессовые состояния сложно обнаружить на ранних стадиях по внешнему виду растительности, поэтому на сегодняшний день актуальной задачей является разработка методов и аппаратурных средств для дистанционного оперативного контроля состояния растений (см., например, работы [1-4]).



Число работ, посвященных разработке лазерного флуоресцентного метода контроля состояний растений довольно велико. Однако, многие вопросы остаются неясными. Наиболее важными из них являются вопросы о стабильности измеряемых спектров флуоресценции растений (как в нормальном, так и в стрессовых состояниях), об устойчивости спектров флуоресценции к типу почвы, в которой растение высажено, о наиболее эффективных спектральных диапазонах регистрации флуоресцентного излучения растений. Очевидно, что эти неясные вопросы могут быть прояснены только по результатам анализа экспериментальных исследований.

Работа посвящена экспериментальным исследованиям лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растительности для длины волны возбуждения флуоресценции 532 нм.

### Структурная схема

Для исследования лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растительности была создана лабораторная установка.

Структурная схема лабораторной установки содержит блоки возбуждения флуоресценции, регистрации флуоресцентного излучения, обработки и хранения данных, управления. Для управления использовалось специальное программное обеспечение, реализованное в среде визуального программирования LabVIEW.

В качестве источника возбуждения излучения флуоресценции была использована вторая гармоника лазера на иттрий-алюминиевом гранате, активированном ионами неодима (энергия лазерного импульса на длине волны 532 нм  $\sim 0,37$  мДж со среднеквадратичным отклонением  $\sim 3\%$ ).

Блок регистрации излучения флуоресцентного излучения построена на основе полихроматора и высокочувствительного матричного детектора с усилителем яркости.

Измерения спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений проводилось в спектральном диапазоне 600 – 800 нм.

### Показатели качества

В публикациях, посвященных флуоресцентному методу контроля состояния растений, регистрация флуоресцентного излучения проводится в узких спектральных диапазонах (около двух длин волн: длина волны  $\lambda_1$  в диапазоне 680 – 690 нм,  $\lambda_2$  – в диапазоне 730 – 740 нм) и в качестве признака для обнаружения стрессовых состояний используется отношение  $R = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}$  интенсивностей флуоресценции  $I(\lambda)$ , регистрируемых в этих спектральных диапазонах:

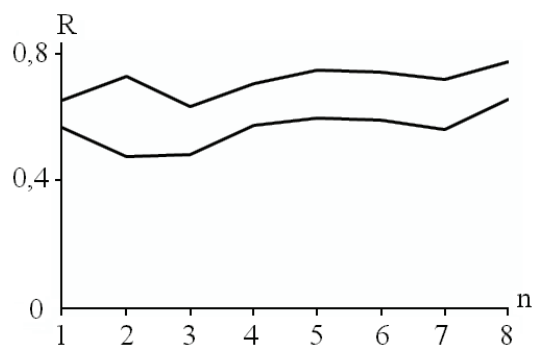
$$R_{680/740} = \frac{I(680)}{I(740)}, \quad R_{685/740} = \frac{I(685)}{I(740)}, \quad R_{680/730} = \frac{I(680)}{I(730)}, \quad R_{685/730} = \frac{I(685)}{I(730)}, \quad R_{690/740} = \frac{I(690)}{I(740)},$$

$$R_{690/735} = \frac{I(690)}{I(735)}, \quad R_{685/735} = \frac{I(685)}{I(735)} \text{ при ширине спектральных диапазонов от 5 до 20 нм.}$$

При обработке использовались отношения  $R$  интенсивности флуоресценции на двух длинах волн:  $R_{680/740}$ ,  $R_{685/740}$ ,  $R_{680/730}$ ,  $R_{685/730}$ ,  $R_{690/740}$ ,  $R_{690/735}$ ,  $R_{685/735}$  при ширине спектральной полосы регистрации 10 нм, а также  $R_{680-712/712-750}$ .

Измерения проводились для различных растений и стрессов, вызванных разными причинами: внесением в почву различных загрязнителей, избыточным или недостаточным поливом, механическими повреждениями – примятием, обрезанием листьев и корней растений. На рисунке 1 приведен пример результатов обработки спектров флу-

оресценции для травы в нормальном и стрессовом состоянии, вызванном добавлением в почву медного купороса  $\text{CuSO}_4$ . По горизонтальной оси отложен номер используемого отношения R: 1 -  $R_{680/740}$ , 2 -  $R_{685/740}$ , 3 -  $R_{680/730}$ , 4 -  $R_{685/730}$ , 5 -  $R_{690/740}$ , 6 -  $R_{690/735}$ , 7 -  $R_{685/735}$ , 8 -  $R_{680-712/712-750}$ .



**Рисунок 1.**

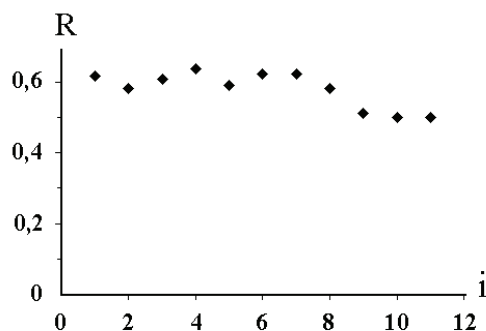
Величина R для травы в нормальном и стрессовом состоянии

Из рисунка видно, что величина R при стрессовом состоянии растений всегда больше величины R при нормальном состоянии растений.

Сравнительный анализ различных вариантов выбора спектральных диапазонов регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения растений показывает, что для задачи контроля состояния растений наиболее эффективными (с точки зрения надежности правильного обнаружения стрессовых состояний) диапазонами регистрации флуоресцентного излучения являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм.

На рисунке 2 показаны типичные результаты для отношения R интенсивностей флуоресценции растения в узких спектральных диапазонах шириной 10 нм с центральными длинами волн 685 и 740 нм в зависимости от номера измерения  $i$ . Измерения проводились в середине дня в течение нескольких часов для разных образцов одного растения (горчицы), посаженных в одно и то же время.

Для проведенных нами измерений с разными растениями в нормальном состоянии величина стандартного отклонения R лежала в диапазоне 2,6% - 20,5% (от среднего значения). При одиночных измерениях возможны аномальные выбросы величины отношения R. Более надежным представляется контроль состояния растений по средней величине отношения R даже для небольшой серии измерений.



**Рисунок 2.**

Типичные результаты измерений для отношения  $R_{685/740}$

Экспериментальные измерения спектров лазерно-индуцированной флуоресценции растений, высаженных в различных почвах (песок, универсальный почво-грунт, гидропонический субстрат) показывают, что величина отношения  $R$  интенсивности флуоресценции на длине волны 685 нм к интенсивности флуоресценции на длине волны 740 нм устойчива к изменению типа грунта, в котором высажено растение. Величина отношения  $R$  для разных типов грунта имеет разброс такого же порядка, как и разброс величины отношения  $R$  для разных образцов растения при одном типе грунта.

#### **Заключение**

Экспериментальные исследования показывают устойчивость результатов лазерного флуоресцентного метода контроля состояния растений. Наиболее перспективными диапазонами регистрации флуоресцентного излучения являются спектральные диапазоны с центральными длинами волн 685 и 740 нм. Измерение величины  $R$  может быть положено в основу дистанционного лазерного метода контроля состояния растений.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект 1965/14).

#### **Список литературы:**

1. K. Saito, *Industrial Applications of Laser Remote Sensing*, **1**, pp. 99-114, (2012).
2. A.S. Gouveia-Neto, E.A. da Silva, R.A. Oliveira, P.C. Cunha, E.B. da Costa, T.J.R. Câmara, L.G. Willadino, *Proc. SPIE*, **7568**, pp. 756822 -1 - 756822 -8, (2011).
3. J. Yanga, W. Gong, S. Shia, L. Dua, J. Suna, S. Songe, *Spectroscopy letters*, **49**, № 4, pp. 263–267, (2016).
4. M. Hedimbi, S. Singh, A. Kent, *Natural Science*, **4**, № 6, pp. 395-401, (2012).

## **LASER FLUORESCENCE METHOD OF VEGETATION MONITORING**

**Bullo O.A., Fedotov Yu.V., Belov M.L., Gorodnichev V.A.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Experimental laboratory investigations of the laser-induced fluorescence method of vegetation monitoring were conducted. It is shown that spectral bands with central wavelengths 685 и 740 nm are most efficient bands recording. It was established that the influence of stresses is manifested in changes of fluorescence spectra shape.

# МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПЛЁНОЧНЫХ СТРУКТУР

**Цепулин В.Г., Толстогузов В.Л.**

НОЦ «Фотоника и ИК-техника»,  
Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

В настоящей работе представлены системы, которые перспективно использовать для контроля оптико-электронных устройств, содержащих в себе плёночные покрытия, таких как жидкокристаллические экраны, интегральные оптико-электронные компоненты и МОЭМС. Представленные системы позволяют осуществлять контроль геометрических параметров многослойных плёночных покрытий с погрешностью до единиц нанометров, а также определять наличие загрязнений и их размер с точностью до 1 мкм.

## **Введение**

В целях контроля качества и выявления брака при производстве оптико-электронных устройств необходимо применять современные высокоскоростные методы измерения параметров и характеристик производимой продукции. Оптические методы позволяют провести измерения таких параметров быстро и с высокой точностью.

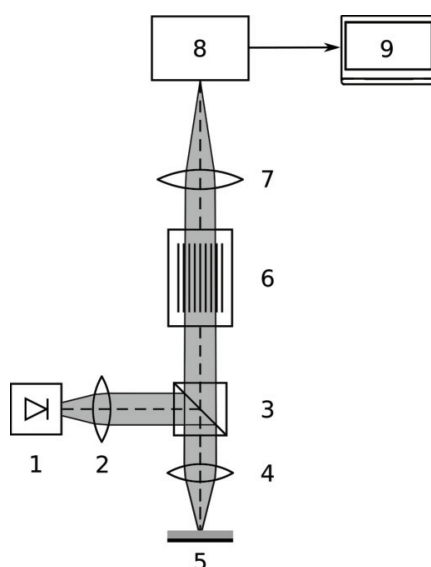
Многие электронные и оптико-электронные устройства, такие как микросхемы, сенсорные и жидкокристаллические экраны, солнечные батареи, содержат плёночные покрытия и структуры, в том числе многослойные, сделанные из металлических, полупроводниковых, диэлектрических и прозрачных проводящих материалов, от которых зависят характеристики работы всего прибора. Для контроля качества нанесения таких покрытий необходимо проводить измерение их геометрических параметров: размеров и толщин слоев, а также определять наличие загрязнений.

## **Структурная схема**

С целью осуществления высокоскоростного контроля оптико-электронных приборов на этапе производства были разработаны алгоритмы и аппаратура для нахождения толщин плёночных структур с использованием методов рефлектометрии. Полученные алгоритмы позволяют проводить быстрое решение обратных задач с использованием набора спектральных изображений измеряемого образца. В результате обработки изображений может быть получено распределение толщин многослойных плёночных структур в плоскости их поверхности.

Разработанные методы и алгоритмы могут быть использованы для контроля, как единичных образцов продукции, так и в условиях массового производства. Схема системы для исследования единичных образцов представлена на рисунке 1. Для освещения плёночного покрытия в ней используется широкополосный источник излучения 1, излучение от которого, после прохождения через коллимирующую линзу 2, светоделительный кубик 3 и объектив 4, отражается от исследуемого плёночного покрытия 5, а затем проходит через перестраиваемый акустооптический фильтр с двойным монохроматором 6, который пропускает излучение в спектральной полосе шириной 2 нм. Далее излучение

фокусируется на матрице 8 с помощью объектива 7. После регистрации матричным приемником излучения, изображения поступают в память персонального компьютера, после чего выполняется их обработка и нахождение толщин.

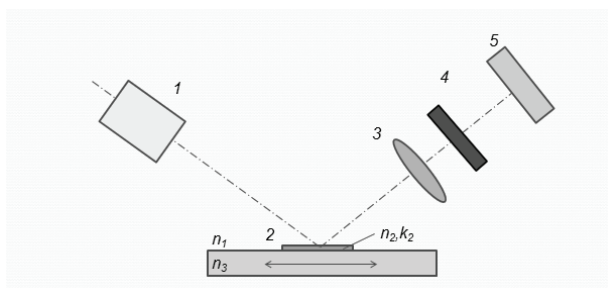


**Рисунок 1.**

Схема системы измерения толщин:

- 1 – широкополосный источник излучения; 2 – коллимирующая линза;
- 3 – светоделительный кубик; 4 – объектив; 5 – исследуемая пленочная структура;
- 6 – акустооптический фильтр; 7 – фокусирующий объектив;
- 8 – матричный приемник излучения; 9 – персональный компьютер

Система для проведения массового контроля состоит из нескольких каналов, каждый из которых работает в своем спектральном диапазоне. Оптическая схема одного канала представлена на рисунке 2. После регистрации измеряемого образца с помощью нескольких каналов осуществляется обработка полученных изображений и определяются толщины пленочных покрытий. Представленная система является универсальной, поскольку позволяет помимо нахождения распределения толщин также определять наличие дефектов контролируемой продукции, например, разрывов дорожек. Также при использовании модуля, формирующего структурированную подсветку, система позволяет определять наличие загрязнений и их размер с погрешностью до единиц микрометров.



**Рисунок 2.**

- Оптическая схема канала установки для осуществления массового контроля:
- 1 – перестраиваемый источник света; 2 – измеряемый образец; 3 – объектив;
- 4 – поляризатор; приемник излучения

### **Показатели качества**

Основным показателем качества разработанной системы является погрешность измерения слоев толщины, которая в зависимости от количества используемых спектральных изображений, слоев покрытия, соотношения показателей преломления составляет 10 нм, что соответствует погрешности измерения известных аналогов. Отличительными особенностями системы является высокая скорость обработки информации и виброустойчивость, что позволяет применять ее для контроля продукции в условиях массового производства.

### **Заключение**

Представлены высокоскоростные методы контроля качества плёночных структур матричных приёмников излучения, жидкокристаллических экранов, интегральных оптико-электронных компонентов и МОЭМС, позволяющие осуществлять измерение распределения геометрических параметров многослойных структурных плёночных покрытий с погрешностью до единиц нанометров, а также оптические параметры материалов. Высокая скорость достигается за счёт использования спектрального метода на основе перестраиваемого акустооптического видеомонохроматора либо многоканальной системы с параллельным процессом измерения в разных спектральных диапазонах.

## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА В ОБЛАСТИ БИМЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ**

**Щукин С.И.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Развитие биомедицинской техники должно быть тесно связано как с приоритетами научно-технологического развития страны, так и с приоритетами развития Мировой и отечественной системы здравоохранения.

В этом смысле ориентация на создание медицинской техники и оборудования для лечения и диагностики, в первую очередь социально-значимых заболеваний, обладает безусловным приоритетом.

К таковым, в порядке приоритета, относятся заболевания сердечно-сосудистой системы, онкологические заболевания, и заболевания и травмы опорно-двигательного аппарата, сахарный диабет и другие. При оценке инновационного и рыночного потенциала создаваемой медицинской техники также необходимо учитывать тот факт, что с увеличением продолжительности жизни населения доля хронических заболеваний возрастает. Эти тенденции приводят к тому, что возрастает востребованность в медицинском обо-



рудовании для физической терапии, реабилитации и ранней диагностики возрастных категорий пациентов.

Исходя из этих приоритетов, в докладе представлены результаты научно-технических исследований и опытных разработок лабораторий и кафедр факультета биомедицинской техники в таких областях как:

- аппаратура для электромагнитной терапии пациентов с хронической венозной недостаточностью с использованием в цепи обратной биологической связи параметров регионарного кровообращения;

- аппаратура для биосинхронизированной электромагнитной терапии пациентов с хроническими облитерирующими заболеваниями артерий нижних конечностей включая пациентов с микроангиопатиями и нейропатиями при атеросклерозе и сахарном диабете;

- биотехнические системы для электроимпедансного мониторинга и картирования насосной функции и движения границ отделов сердца с возможностью получения индивидуального паттерна работы сердца пациента;

- новой технологии выявления сердечных аритмий на основе комбинирования электрокардиографических и электроимпедансных прекардиальных измерений;

- аппаратуры для детектирования факта прокола кровеносного сосуда и избежания двойного прокола при венепункции и пункции артерий на основе измерения биоимпеданса иглы-электрода;

- систем для неинвазивного мониторинга кровообращения печени и других паренхимотозных органов;

- систем для телемедицины и мониторинга здоровья (M-Health);

- экзо- и эндопротезы, экзоскелеты с антропоморфным пропорциональным управлением на основе использования нового типа нейромышечного интерфейса.

В докладе также обсуждаются приемлемые для промышленности и вузовской науки формы кооперации направленные на выпуск, реализацию, сопровождение и сервис высокотехнологичной медицинской техники.

## **АЛГОРИТМ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ПО МЕТОДУ ДВУХ ПЛОСКОСТЕЙ**

**Гладышева Я.В., Барышников Н.В., Животовский И.В., Денисов. Д.Г.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

В настоящее время большой интерес вызывают задачи, связанные с определением и контролем параметров качества крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности. Оптика данного класса применяется в области внегалактической астрономии [1], для решения задач регистрации гравитационных волн [2], при создании современных

телескопических систем для наблюдения за космическими летательными аппаратами, а также в силовой лазерной оптике [3-5].

Требования к качеству поверхностей подобных оптических деталей очень высоки, так как определяют качество функционирования технической системы в целом. Значение среднеквадратического отклонения распределения высот по поверхности детали (СКО) может достигать до 0.1нм. На сегодняшний день технология изготовления оптических поверхностей позволяет получить изделия различной конфигурации с требуемыми характеристиками. Особую актуальность приобретает разработка методов контроля качества этих поверхностей в условиях производства.

Качество поверхностей высокой точности принято оценивать в пространственно-частотных диапазонах, связанных с пространственным масштабом неоднородностей: I (450 - 33мм), II (33 - 2,5мм), III (2,5 - 0,12мм) и IV (0,12 - 0,01мм) диапазоны [6]. Для каждого диапазона устанавливаются свои требования к размеру неоднородностей рабочей поверхности детали. Границы диапазонов определяются в основном возможностями приемной системы интерферометра.

Для контроля параметров качества поверхности в каждом диапазоне используются интерферометрические методы восстановления профиля оптической поверхности [7,8]. Однако для получения необходимой точности измерений при использовании интерферометрических методов необходимо проведение калибровки эталонной поверхности, входящей в схему интерферометра. Так как качество измеряемой детали сравнимо с качеством эталонной поверхности, то для получения объективных результатов требуется исключить ошибки поверхности эталона из результатов измерений. Для решения этой задачи применяются методы абсолютной калибровки.

Единственный метод абсолютной калибровки, который позволяет определить профиль исследуемой поверхности с необходимой точностью, это метод двух плоскостей. Метод был предложен в работе по созданию активных сред для сверхмощного лазера в проекте Laser Megajoule [9] и заключается в перемещении вспомогательной плоской пластины относительно эталонной пластины в плоскости перпендикулярной оптической оси. Метод двух плоскостей позволяет получить информацию о форме эталонной поверхности, отделив ее от формы поверхности вспомогательной пластины. При обработке полученных экспериментальных данных используется анализ на основе преобразования Фурье профиля поверхности.

На основе метода двух плоскостей был разработан алгоритм абсолютной калибровки оптической поверхности и создано оригинальное программное обеспечение [9-11]. Приведены численные и экспериментальные результаты оценки погрешности восстановления профиля исследуемой поверхности, полученные при помощи использования разработанного программного обеспечения.

Анализ алгоритма по методу двух плоскостей состоял из двух этапов: исследовании математических моделей профилей оптических поверхностей и профилей характерных крупногабаритных поверхностей высокой точности.

В качестве математических моделей профилей поверхностей были взяты гармоники, поскольку любую шероховатую поверхность можно представить в виде набора гармоник разного порядка. Результаты исследования гармоник показали, что при представлении неоднородностей профиля поверхности в виде гармоник разного порядка в соответствии с выделенными диапазонами, алгоритм абсолютной калибровки позволяет вычислить исследуемый профиль поверхности в I, части II диапазона и III диапазонов с погрешностью менее 5%.

Для проведения исследования приближенного к реальным условиям был взят профиль поверхности характерный для крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности. Этот профиль был получен при измерении плоскопараллельной пластины диаметром 100мм на интерферометре Intellium H2000 (ESDI, USA). В результате измерения был получен двумерный профиль поверхности. Полученный двумерный профиль был восстановлен при помощи алгоритма абсолютной калибровки. В результат проведенного исследования рассчитана алгоритмическая погрешность алгоритма абсолютной калибровки по методу двух плоскостей, также повторяемость результата.

На основании проведенных исследований алгоритма и программного комплекса, реализующих метод абсолютной калибровки по методу двух плоскостей, можно заключить, что выбранный метод, а также его реализация, могут быть использованы в методике контроля качества крупногабаритных оптических поверхностей высокой точности.

#### **Список литературы**

1. Carruthers T. F., Reitze D. H. LIGO: Finally Poised to Catch Elusive Gravitational Waves? //Optics and Photonics News. – 2015. – Т. 26. – №. 3. – С. 44-51.
2. Udry S. et al. Exoplanet Science with the European Extremely
3. Large Telescope. The Case for Visible and Near-IR Spectroscopy at High Resolution // arXiv preprint arXiv:1412.1048. – 2014.
4. Spaeth M. L. et al. National Ignition Facility wavefront requirements and optical architecture //Optical Engineering. – 2004. – Т. 43. – №. 12. – С. 2854-2865.
5. Abdulkadyrov M. A. et al. An unequal-arm Twyman-Green IR interferometer for monitoring the shape and quality of the surfaces of large optical items at the grinding stage // Journal of Optical Technology. – 2010. – Т. 77. – №. 10. – С. 621-627.
6. Bray M., Liard A., Chabassier G. Laser megajoule optics: I. New methods of optical specification //Optical Systems Design and Production. – International Society for Optics and Photonics, 1999. – С. 449-460.
7. Morin F., Bouillet S. Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat //Optical Metrology. – International Society for Optics and Photonics, 2007. – С. 66164G-66164G-11.
8. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov , I. V. Zhivotovskii, V. E. Karasik, V. Ya. Mendeleev “Experimental Analysis of Instrumental Uncertainty in the Measurement Channel of an Optoelectronic System for Monitoring Surfaces of Complex Shape” Measurement Techniques 2015. Vol. 57. n. 12. P. 1371-1377.
9. Gladysheva Y. V. et al. The absolute calibration of high-precision optical flats across a wide range of spatial frequencies //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – Т. 584. – №. 1. – С. 012020.
10. Алгоритм восстановления профиля плоской оптической поверхности высокой точности / Гладышева Я. В., Животовский И. В., Денисов Д. Г., Барышников Н. В. // Измерительная техника. - 2016. - № 2. - С. 28-32.
11. Gladysheva Y. V. et al. Calibration of high precision surfaces of gravitational wave telescope optics.

### **ALGORITHM OF ABSOLUTE CALIBRATION ON BASIS OF METHOD OF TWO FLAT TEST**

**Gladysheva Y.V., Baryshnikov N.V., Zhivotovsky I.V., Denisov. D.G.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

# ВОЛОКОННЫЕ ЭРБИЕВЫЕ ЛАЗЕРЫ УЛЬТРАКОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Сазонкин С.Г., Дворецкий Д.А., Крылов А.А.\*, Пнёв А.Б., Карасик В.Е.

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

\*Научный Центр Волоконной Оптики РАН, г. Москва, Россия  
Волоконные лазеры ультракоротких импульсов

В работе представлены основные параметры разработанных полностью волоконных эрбиевых лазеров ультракоротких импульсов с длительностями импульсов порядка 90 фс и средней выходной мощностью до 30 мВт без использования усилителей, а также различные области их применения.

## Введение

В настоящее время волоконные лазеры ультракоротких импульсов (УКИ) с пассивной синхронизацией мод привлекают к себе большое внимание благодаря перспективным применениям в промышленности, науке и медицине. Лазеры УКИ могут использоваться для повышения точностных и эксплуатационных характеристик аппаратуры частотно-временного сегмента в метрологии оптических частот и в оптических стандартах частоты<sup>1,2</sup>. Для генерации терагерцового излучения требуется стабилизированный лазер УКИ<sup>3</sup>. Также лазеры УКИ нашли применения в оптической когерентной томографии, КАРС и 2-х комб-спекроскопияспекроскопии (Coherent anti-Stokes Raman Scattering microscopy, Adaptive real-time dual-comb spectroscopy). Медицинские применения в основном связаны с офтальмологией и стоматологией. В промышленности лазеры ультракоротких импульсов используются в металлообработке для улучшения их эксплуатационных свойств, а также в микрообработке материалов и маркировке. С помощью лазеров ультракоротких импульсов появилась возможность проследить ход химических реакций в химии и биологии, а также и влиять на них.

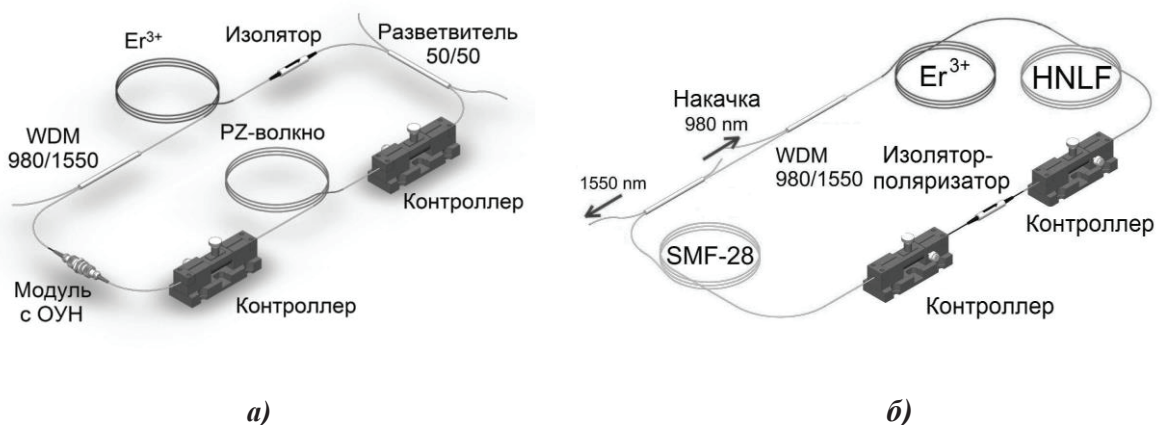
## Структурная схема

На сегодняшний день наиболее предпочтительным способом получения УКИ является механизм синхронизации мод, основанный на нелинейной эволюции поляризации (НЭП) в волоконном световоде (эффект Керра<sup>4</sup>), так как при его использовании возможно получение наименьшей длительности импульса (время отклика составляет порядка 5 фс). Однако, лазеры с данным механизмом синхронизации мод обладают высоким порогом генерации и для самозапуска необходимо использовать достаточно мощные лазеры накачки, что не всегда возможно и целесообразно. В тоже время, существуют различные насыщаемые поглотители, используемые для организации синхронизации мод, такие как полупроводниковое зеркало с насыщаемым отражением SESAM (Semiconductor saturable absorber mirror)<sup>5</sup>, и углеродные наноструктуры (одностенные углеродные нанотрубки (ОУН) и графен)<sup>6</sup>, которые обладают гораздо большим временем релаксации (сотни фемтосекунд) и низким порогом запуска. Следовательно, устойчивая генерация УКИ в режиме синхронизации мод может быть реализована путем внесения в одну схему двух

насыщающихся поглотителей (гибридная синхронизация мод): медленно насыщающегося поглотителя, такого как полупроводниковое зеркало с насыщающим поглотителем SESAM или ОУН, и быстрого поглотителя на основе эффекта Керра. Медленно насыщающийся поглотитель способствует запуску механизма синхронизации мод, а эффект Керра способствует сокращению длительности и улучшения качества импульса.

ОУН являются более перспективными для использования в лазерах с гибридной синхронизацией мод. По сравнению с SESAM, ОУН имеют более простую и дешевую технологию изготовления, возможность использования в линейном и кольцевом резонаторах, а также пикосекундное время релаксации просветленного состояния. ОУН могут быть диспергированы в различные полимерные матрицы, что приводит к формированию тонких пленок высокого оптического качества, которые затем без особых проблем интегрируются в резонатор волоконного лазера.

На рисунке 1а представлена схема резонатора разработанного полностью волоконного лазера с гибридной синхронизацией мод<sup>7</sup>. Резонатор содержит легированное ионами эрбия активное волокно с длиной 2 м с положительной дисперсией ( $D = -30,4$  пс/нм·км на длине волны 1550 нм), поляризационное волокно (PZ-волокно), которое используется для реализации быстрого механизма синхронизации мод, и волокно SMF-28 с отрицательной дисперсией ( $D = 17$  пс/нм·км). В качестве медленного насыщающегося поглотителя использует модуль, состоящий из двух коннекторов FC/APC между которыми расположена пленка с ОУН. Источником накачки является диод с волоконным выходом, излучение которого через мультиплексор (WDM) поступает в активное волокно. При помощи изолятора организуется однонаправленный режим генерации. На рисунке 1б показана схема разработанного полностью волоконного лазера, где используется только механизм синхронизации мод на эффекте Керра<sup>8</sup>. Однако, для упрощения самозапуска режима синхронизации мод, в резонатор было включено волокно, обладающее высокой нелинейностью (HNLF), с положительной дисперсией ( $D = -100$  пс/нм·км). Для упрощения сборки резонатора лазера с гибридной синхронизацией мод была разработана схема, в которой вместо PZ-волокна используются коммерческий доступный изолятор-поляризатор (ISO-PM). Изолятор-поляризатор совмещает в себе функции изолятора и поляризатора одновременно.



**Рисунок 1.**

Схемы резонаторов волоконных лазеров:

а) гибридная синхронизация мод, б) с использованием волокна с высокой нелинейностью



## Показатели качества

Основные выходные характеристики разработанных лазеров приведены в таблице на рисунке 2 и сравнение с коммерческим источником. Отметим, что в лазере с гибридной синхронизацией мод с использованием PZ-волокна относительный шум интенсивности (RIN) составляет  $\sim -120$  дБс/Гц, а ширина линии комба (одной спектральной компоненты) 32 кГц. В тоже время, в лазере с гибридной синхронизацией мод с использованием изолятора-поляризатора RIN составил  $< 150$  дБс/Гц, а ширина линии комба 18,1 кГц, что является достаточно хорошим показателем для данного типа лазеров<sup>9</sup>.

Характеристика	Схема с гибридной синхронизацией мод (PZ-волокно)	Схема с гибридной синхронизацией мод (ISO-PM)	Схема с использованием волокна HNLF	EFO-80/100 "Авеста-Проект"
Длительность импульса, фс	92,6	90	84	$< 80$
Центральная длина волны, нм	1560	1560	1560	1560
Средняя выходная мощность, мВт	11,2	16,7	30	10
Частота повторения импульсов, МГц	38,1	42,2	12	70
Энергия в импульсе, нДж	0,3	0,4	2,5	0,15

**Рисунок 2.**

Основные характеристики разработанных лазеров по сравнению с лазером EFO-80/100 «Авеста-Проект» (г. Троицк)

## Заключение

Разработанные волоконные лазеры могут составить конкуренцию для уже присутствующих на рынке лазеров УКИ по своим основным характеристикам. В тоже время, полученные параметры разработанных лазеров позволяют использовать их в областях, где предъявляются особые требования к стабильности частоты повторения импульсов, стабильности выходной мощности и низким шумам источников излучения. Простота изготовления и юстировки полностью волоконной схемы резонатора лазера, может существенно сократить издержки на производство.

## Список литературы:

1. Th Udem, R Holzwarth, T.W. Hansch, *Nature*, **416**, № 6877, pp. 233-237, (2002).
2. M.A. Gubin, A.N. Kireev, A.V. Tausenev, A.V. Konyashchenko, P.G. Kryukov, D.A. Tyurikov, A.S. Shelkovikov, *Laser Phys.*, **17**, № 11, pp. 1286-1291, (2007).
3. P Uhd Jepsen, R.H. Jacobsen, S.R. Keiding, *J. Opt. Soc. Am. B*, **13**, №11, pp. 2424-2436, (1996).
4. M. Fermann, *IEEE Journal of Sel. Topics in QE*, **15**, pp. 191-206, (2009).
5. O. Okhotnikov, A. Grudinin, M. Pessa, *New J. of Physics*, **6**, № 177, pp. 1-22, (2004).
6. B. Xu, A. Martinez, S.Y. Set, C.S. Goh, S. Yamashita, *Laser Phys. Lett.*, **11**, № 2, pp. 25101, (2014).
7. A.A. Krylov, S.G. Sazonkin, V.A. Lazarev, D.A. Dvoretzkiy, S.O. Leonov, A.B. Pnev, V.E. Karasik, V.V. Grebenyukov, A.S. Pozharov, E.D. Obratsova, E.M. Dianov, *Laser Phys. Lett.*, **12**, № 6, pp. 065001-065006, (2015).



8. D.A. Dvoretzkiy, V.A. Lazarev, V.S. Voropaev, Zh.N. Rodnova, S.G. Sazonkin, S.O. Leonov, A.B. Pnev, V.E. Karasik, A.A. Krylov, *Opt. Express*, **23**, № 26, pp. 33295, (2015).

9. D.A. Dvoretzkiy, S.G. Sazonkin, V.S. Voropaev, S.O. Leonov, A.B. Pnev, V.E. Karasik, A.A. Krylov, E.D. Obraztsova, *2016 International Conference Laser Optics (LO)*, pp. R1-28 - R1-28, (2016)

## **AFIBER ULTRASHORT-PULSE ERBIUM LASERS FOR VARIOUS APPLICATIONS**

**Sazonkin S.G., Dvoretzkiy D.A., Krylov A.A.\*, Pnev A.B., Karasik V.E.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia  
\* Fiber Optics Research Center of the RAS, Moscow, Russia

## **СИНТЕЗ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ КАМЕРЫ СО СТЕГАНОГРАФИЧЕСКИМ КАНАЛОМ**

**Колесников М.В., Тимашова Л.Н., Трофимов Н.Е.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
Оптотехника

Идентификация устройств регистрации видеоинформации – важная задача при проведении судебной экспертизы. Предложена функциональная схема телевизионной камеры, имеющей вспомогательный оптический канал для встраивания идентификационных данных. Излагается методика расчета геометрических параметров оптической системы и приведены результаты синтеза оптической системы.

Широкое распространение высококачественных цифровых телевизионных камер и современных инструментов редактирования видеозаписей приводит к необходимости совершенствования методов, позволяющих идентифицировать устройства регистрации изображений на основе анализа видеозаписи.

В настоящее время для решения данной задачи применяются пассивные и активные методы идентификации источника видеоинформации. Известны пассивные методы, которые основаны на сравнении характеристик реализаций помех, извлеченных из кадров видеозаписей, с реализациями помех, полученными конкретной телевизионной камерой<sup>1</sup>. Активные методы предполагают встраивание скрытых идентификационных данных и являются более надежными. Процесс встраивания осуществляется либо дополнительной обработкой сигнала в электронном тракте телевизионной камеры<sup>2</sup>, либо

формированием дополнительного оптического сигнала (стеганограммы) в плоскости регистрации матричного приёмника излучения устройства регистрации<sup>3,4,5</sup>. Второй метод имеет следующие преимущества: для кодирования оптического сигнала используются изготовленные с помощью дорогостоящего оборудования оптические элементы, которые сложно подделать; отсутствует нестандартная цифровая обработка видеoinформации в электронном тракте, что повышает доверие к содержимому видеозаписи; метод может быть реализован для практически любых устройств регистрации изображений, представленных на рынке.

В работах<sup>4,5</sup> предложено формировать стеганограмму в виде дифракционной картины в дальней зоне от амплитудно-фазового транспаранта, в параметрах которого кодируется полезное сообщение. Особый интерес представляет практическая реализация данного подхода.

В настоящей работе предложена функциональная схема телевизионной камеры со стеганографическим каналом (рис. 1), позволяющая регистрировать изображения объектов с наложенной на него стеганограммой. В состав изображающего оптического канала входят афокальная система Галилея 1, апертурная диафрагма 2, светоделительный кубик 3, фотографический объектив 4, матричный приёмник излучения (МПИ)<sup>5</sup>.

Стеганографический канал содержит полупроводниковый лазер 6, коллимационный объектив 7, амплитудный транспарант 8, фазовый транспарант 9, объектив 4, выполняющий функцию фурье-преобразующего объектива (ФПО), МПИ 5.

Встраиваемая информация содержится в пространственном распределении амплитудного коэффициента пропускания  $\tau_a(\xi, \eta)$  транспаранта 8. Для подавления нулевого порядка дифракции и уменьшения динамического диапазона в распределении интенсивности фурье-спектра непосредственно за амплитудным транспарантом 8 установлен фазовый транспарант 9 с псевдослучайным распределением фазового коэффициента пропускания  $\tau_\phi(\xi, \eta)$ , которое должно быть известно при восстановлении идентификационных данных. На практике для этой цели используются фазовые транспаранты с бинарным распределением фазы<sup>6,7</sup>, состоящие из одинаковых ячеек прямоугольной формы, в которых с равной вероятностью обеспечивается сдвиг фаз 0 или  $\pi$ .

Распределение освещенности в стеганограмме пропорционально квадрату модуля фурье-спектра распределения совместного комплексного коэффициента пропускания транспаранта и фазовой маски<sup>7</sup>:

$$E_{ст}(x', y') = k \cdot \left| \mathfrak{F} \{ \tau_\phi(\xi, \eta) \cdot \tau_a(\xi, \eta) \} \right|^2, \quad (1)$$

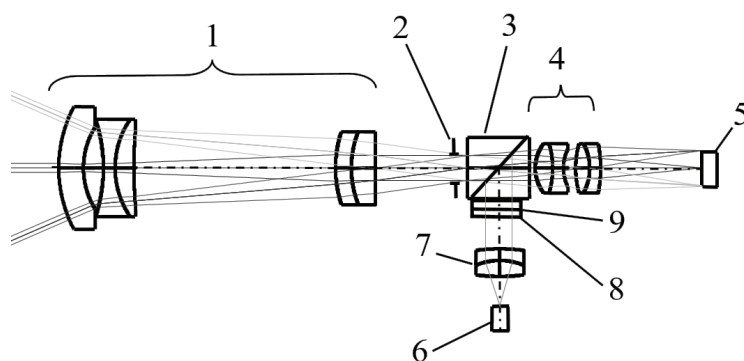
где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\mathfrak{F} \{ \}$  – оператор преобразования Фурье.

При разработке функциональной схемы были решены следующие задачи:

- минимизация геометрических искажений стеганограммы за счёт обеспечения соосности визирных осей двух каналов и их перпендикулярность плоскости чувствительных элементов МПИ;

- минимизация габаритов оптической системы за счёт размещения апертурной диафрагмы 2 в непосредственной близости от поверхности светоделительного кубика;

- исключение виньетирования в стеганографическом канале за счёт оптического сопряжения апертурной диафрагмы 2 изображающего канала и плоскости расположения фазового транспаранта 9.



**Рисунок 1.**

Функциональная схема двухканальной оптической системы со стеганографическим каналом

В работе предложена методика расчета геометрических параметров оптической системы, исходными данными для которой являются топологические параметры МПИ и требуемое фокусное расстояние изображающего канала. С использованием программного обеспечения Zemax проведен синтез оптической системы телевизионной камеры со стеганографическим каналом. ФПО выполнен в виде двух разнесенных двухлинзовых склеенных объективов, ахроматизированных для видимого диапазона. Для минимизации искажений, возникающих при восстановлении идентификационной информации, обеспечено соблюдение условия<sup>8</sup>, при котором волновые aberrации стеганографическом канале не превышали значения  $0,5\lambda$ . Для достижения высокой разрешающей способности изображающего канала, оптическая схема афокальной системы построена в виде композиции трехлинзового отрицательного компонента включающего хроматическую склеенную поверхность и двухлинзового положительного компонента.

Предложенная методика позволяет синтезировать оптические системы телевизионных камер со стеганографическим каналом, обеспечивающие высокое качество, как изображения объектов, так и формируемой стеганограммы.

#### Список литературы:

1. J. Lukas, J. Fridrich, M. Goljan, *Image and Video Communications and Processing*, Proc. SPIE 5685, pp. 16–20, (2005).
2. S. D. Roy, Xin Li, Y. Shoshan, A. Fish, *IEEE Transactions on Circuits for Systems for Video Technology*, vol. 23, nom. 2, pp. 289-301, (2013).
3. В.Я. Колючкин, М.В. Колесников, В.Ю. Колесников, Г. М. Мосягин, Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». №1. с. 29–40, (2010).
4. В.Я. Колючкин, М.В. Колесников, IX Международная конференция «Прикладная оптика-2010». Сборник трудов, т.1, ч.2, с. 9–13, (2010).
5. М.В. Колесников, *Инженерный вестник*, №02, с. 501–510, (2013).
6. С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян, *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. № 2 (79). С. 92–104, (2010).
7. П.В. Ежов, О.А. Ильин, Т.Н. Смирнова, Е.А. Тихонов, *Квант. Электроника*, № 33(6). С. 559–562, (2003).
8. Тимашова Л. Н., Трофимов Н. Е., *Современные проблемы оптоэлектроники: сборник статей* (Труды / МГТУ им. Н. Э. Баумана ; № 610). - С. 119-129., (2013).

## **SYNTHESIS OF CAMERA LENS WITH OPTICAL DATA EMBEDDING**

**Kolesnikov M.V., Timashova L.N., Trofimov N.E.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Video source identification is very important in forensics analysis. Scheme of camera lens with optical data embedding device is proposed. Optical system design technique and synthesis results are given.

## **ИНОВАЦИОННЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ И ДИФРАКЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ**

**Одинокое С.Б., Ковалев М.С., Соломашенко А.Б., Николаев В.В.,  
Сцепуро Н.Г., Град Я.А., Бетин А.Ю., Дроздова Е.А., Малинина П.И.,  
Гурылев О.А.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
Оптотехника

В настоящее время одним из перспективных практических применений «плоской» оптики является разработка голограммных и дифракционных оптических элементов (ГОЭ-ДОЭ) с бинарным и многоуровневым поверхностным рельефом, а также создание на их базе приборов и устройств. Дисплеи на основе световодных пластин и дифракционных оптических элементов (ДОЭ) активно применяются в системах отображения информации и визуализации, где наблюдаемое изображение знако-символьной информации накладывается на изображение реальной сцены.

Преимуществом систем отображения информации на основе световодных пластин с ДОЭ является то, что в отличие от классических дисплеев выходной зрачок оптической системы не просто проецируется в плоскость расположения глаз оператора, а увеличивается до необходимых размеров за счет наличия световодной пластины. Таким образом, обеспечивается размер выходного зрачка индикатора до 40 мм при сравнительно малом размере выходного зрачка коллимирующей оптической системы (до 10 мм), что позволяет существенно снизить массогабаритные параметры дисплея, что позволяет создавать достаточно компактные устройства (в виде очков), в том числе и бытового применения. При условии, что допустимые нагрузки на голову и шею человека-оператора строго регламентированы и серьезно ограничены, такая схема реализации открывает новые и существенно более широкие возможности для их применения дисплеев на основе свето-

водных пластин в системах дополненной реальности.

В совокупности с развитием цифровых и мультимедийных технологий подобные устройства находят все большее применение в различных отраслях, и спрос на них с каждым годом неуклонно растет. Таким образом, существует реальная потребность разработки дисплеев на основе световодных пластин с ДОЭ и для их последующего возможного применения в таких сферах как логистика, связь, авиация, медицина, производство, ремонт и техническое обслуживание и т.п. Благодаря тому, что выводимая дисплеем картинка будет накладываться на изображение реальной сцены, это устройство позволит, например, отображать карту местности, информацию о дорожной ситуации, маршрут до места назначения, параметры движения транспортного средства, что существенно упростит и сделает более безопасным его управление. Возможность вывода необходимой информации о расположении товаров на складах и на логистических предприятиях в совокупности с одновременной возможностью считывания штрих- или QR-кодов позволит существенно упростить и ускорить работу обслуживающего их персонала, как и вывод контекстных подсказок во время сборки и ремонта сложных агрегатов, транспортных средств и т.п. соответствующими специалистами.

Также ГОЭ-ДОЭ активно используются в оптических системах коллиматорных прицелов. Для оптического прицела необходимо соблюдение как минимум двух условий: отсутствие ограничений поля зрения и указание точной направленности оружия независимо от удаленности до цели. Подобными качествами обладает коллиматорный прицел.

Голографический прицел из-за аналогичного способа работы также часто называют коллиматорным, хотя устроен он иначе, чем оптический коллиматорный прицел. В нем на прозрачной пластине, находящейся в корпусе прицела, записано голографическое изображение прицельного знака. При появлении опорного когерентного излучения восстановленное с голограммы изображение проецируется в пространство предметов.

Сфера приложений ГОЭ является достаточно широкой благодаря их широким функциональным возможностям по сравнению с традиционной оптикой. При этом, как правило, речь не идет о замене линзовых оптических элементов на дифракционные, а новая элементная база оптики позволяет решать новый класс прикладных задач. Еще одним важным достоинством ГОЭ является их легкая тиражируемость как на пластинках поликарбоната или полиметилметакрилата (хорошо известных в оптике материалов), так и на пленочных материалах типа лавсана с термолаковым слоем. Этим обусловлена низкая стоимость ГОЭ в продукции массового назначения.

Актуальность и востребованность голографических коллиматорных прицелов связана со следующими их преимуществами:

- выполнение прицеливания в динамике при движении стрелка;
- видимое увеличение прицела практически равно единице, благодаря чему при стрельбе не искажается окружающее пространство.
- формирование изображения прицельного знака с большим динамическим диапазоном изменения яркости обеспечивающим работу в яркий солнечный день и ночью.

Поле зрения остается полностью открытым и ограничивается лишь размерами ГОЭ и входным защитным стеклом. Прицельный знак, окружающая местность и цель всегда находятся в поле зрения, обеспечивая непрерывность наблюдения при поиске и обнаружении цели, а также между выстрелами. Имеется возможность оперативного изменения в реальном времени типа прицельного знака, исходя из условий окружающей среды, вида соревнований, типа мишени, расстояния до цели, что приводит к значительному повы-

шению скорости и точности стрельбы. Расположение изображения прицельного знака и цели в одной плоскости минимизирует величину параллакса, что позволяет производить выстрел при совмещении прицельного знака и цели независимо от угла наблюдения цели и положения стрельбы.

В работе анализируются и проводится сравнение различных типов оригинальных оптических систем голографических индикаторов знако-символьной информации и голографических коллиматорных прицелов.

## **АЛГОРИТМ СЕЛЕКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**Колючкин В.Я., Бойков В.А.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
Оптико-электронное приборостроение

Представлен алгоритм селекции изображений объектов в системах технического зрения, позволяющий эффективно, в режиме реального времени, решать задачу автоматического сопровождения объекта на сложном пространственно неравномерном фоне.

### **Введение**

Эффективность систем технического зрения (СТЗ), предназначенных для сопровождения движущихся объектов, в значительной степени зависит от алгоритмов, используемых для выполнения процедуры селекции изображения объекта. Сложность разработки эффективного алгоритма селекции объектов обусловлена априорной неопределенностью типа объекта, подлежащего сопровождению, его ракурса, скорости и начальным координатам. Изображения объектов и фона могут иметь сложную пространственную структуру и содержать аддитивную помеху. Кроме этого, алгоритмы обработки изображений в СТЗ должны работать в реальном времени, что накладывает жесткие ограничения на их вычислительную сложность.

### **Структура**

Авторами разработан алгоритм селекции изображений объектов на основе Random Ferns Method (в дальнейшем RFM) <sup>1,2</sup>. Особенностью метода RFM является то, что описание изображений задаётся бинарными дескрипторами, объединёнными в группы – «случайные папоротники» (Random Ferns).

Суть предлагаемого алгоритма заключается в следующем. В поле исследуемого кадра формируется сетка анализа, представляющая собой набор фрагментов кадра, которые впоследствии оцениваются на похожесть с изображением объекта. Сетка анализа формируется



в пределах выделенной в поле кадра области анализа, с горизонтальным и вертикальным сдвигом на 5% от ширины и высоты изображения объекта. Размеры фрагментов определяются на основе априорных данных о размерах объекта. Область анализа выделяется на основе априорных данных о положении изображения объекта в поле кадра.

Каждый фрагмент сетки подвергается анализу с целью классификации, которая выполняется в два этапа. На первом этапе классификации производится оценка среднего значения и СКО яркости в пределах каждого из фрагментов сетки изображений и сравнение этих значений с априори известными для данного объекта. Таким образом, исключаются фрагменты изображения, которые с высокой вероятностью не содержат изображения объекта. На втором этапе анализа фрагменты, выделенные на первом этапе, подвергаются классификации по методу RFM. Все фрагменты кадра, классифицируемые RFM как изображение объекта, участвуют в формировании итогового целеуказания.

Алгоритм, основанный на классификаторе RFM, нуждается в предварительном обучении, в процессе которого происходит накопление априорной информации о распределении яркости в изображении объекта, его размерах и предполагаемом положении в поле кадра, а также возможных искажениях, возникающих при формировании изображения объекта.

### **Показатели качества**

На основании проведённых численных экспериментов, установлено, что алгоритм селекции на основе RFM при значениях отношения сигнала к шуму  $>10$  обеспечивает надежную селекцию изображений различных объектов на пространственно неравномерном фоне. Алгоритм обладает достаточно высоким быстродействием, позволяющим при селекции зашумленных изображений объектов на пространственно неравномерном фоне обрабатывать кадры размером  $1024 \times 1024$  пикселей за время, не превышающее 20 мс.

### **Заключение**

По результатам исследований можно сделать вывод о целесообразности использования алгоритма селекции на основе RFM в программном обеспечении (ПО) СТЗ с подвижным датчиком изображений, работающим в режиме реального времени. Обучение алгоритма целесообразно осуществлять на начальном участке траектории объекта, используя для селекции объекта другие методы, например, описанные в работе <sup>3</sup>. В процессе дальнейшего сопровождения объекта может осуществляться дообучение классификатора.

Отладка и апробация алгоритма производились в составе ПО СТЗ «Сажень-ТМ» в исполнении «видеотеодолит» производства АО «НПК «СПП». Произведено внедрение указанного алгоритма в работу штатной программы сопровождения объекта, входящей в состав комплекса ПО видеотеодолита.

### **Список литературы:**

1. M.Ozuysal, M.Calonder, V.Lepetit, P.Fua. Fast Keypoint Recognition using Random Ferns // *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*. Vol. 32. № 3, pp. 448-461, (2010).
2. В.А. Бойков, В.Я. Колочкин. Алгоритм селекции изображений объектов на случайном пространственно неравномерном фоне// *Информационно-измерительные и управляющие системы*. № 3, с. 29-36, (2016)
3. Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. *Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление*. М.: Радиотехника. 176 с, (2008).

# ALGORITHM FOR OBJECT IMAGE SELECTION IN CONDITIONS OF PRIOR UNCERTAINTY

**Boykov V.A, Kolyuchkin V.Y.**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

In this paper we propose an object image selection algorithm, which efficiently provide automatic object tracking on complex, spatially-irregular background. It is suitable for real-time working computer vision systems.

## АПЛАНАТИЧЕСКАЯ СФЕРИЧЕСКАЯ ЛИНЗА С ОСЕВЫМ ЛИНЕЙНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

**Ровенская Т.С., Квиткина К.Э.**

Московский государственный технический университет

им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Расчет оптических систем

Обсуждаются метод расчета, конструкции и монохроматические аберрационные свойства сферических апланатических линз с осевым линейным распределением показателя преломления как альтернатива апланатических асферических линз с однородным показателем преломления.

Инновационная деятельность в Вузах осуществляется во взаимно проникающих и взаимозависимых областях - научно-методической деятельности педагогов и учебно – исследовательской деятельности студентов. Одна из возможных форм педагогических инноваций связана с актуальным обновлением содержания учебного материала. На кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана при подготовке студентов, специализирующихся в области проектирования и расчета оптических систем, значительное внимание уделяется теории и практике проектирования оптическим системам с так называемыми нетрадиционными оптическими элементами.

В процессе творческого освоения такого материала под руководством преподавателя при выполнении студентами научно-исследовательской работы и курсового проектирования возникают условия для продуцирования новаций.

В настоящем докладе излагается сущность такой новации, а именно, метод синтеза сферических линз с осевым линейным распределением показателя преломления (ОРПП), обладающих для расположенного в бесконечности предмета близкой к апланатической степени коррекцией аберраций<sup>1</sup>. С применением разработанного метода получены кон-

структивные описания линз при фокусном расстоянии 100 мм, относительном отверстии 1:2 и угловом поле  $30^\circ$  в диапазоне изменения базового показателя преломления от 1,5 до 1,9; последний соответствует градиентным материалам с осевым распределением показателя преломления, реализуемым на основе оптического стекла. Выполнена оценка аберраций оптических элементов и определены значения их технологически существенных параметров - глубины градиентного слоя и перепада показателя преломления в пределах этого слоя. Исследовано влияние на аберрации смоделированного оптического элемента значения базового показателя преломления градиентной среды и особенности конструктивного исполнения линзы, заключающейся в вариантах обеспечения градиентного слоя - в пределах стрелки первой выпуклой поверхности линзы или в пределах осевой толщины.

Выполнено сравнение синтезированных элементов с альтернативным решением в виде положительной (базовой) однородной линзы с асферической поверхностью второго порядка. Показана близость градиентных и асферических решений в области аберраций третьего порядка с различием в области аберраций высших порядков в широких внеосевых пучках. Выявлены преимущества градиентных линз перед асферическими линзами в области реальных аберраций.

Обсуждаемые элементы могут быть самостоятельными функциональными узлами (например, коллимирующая линза) или входить в состав апертурного компонента многокомпонентной оптической системы в качестве его базовой линзы (объективы – монохроматоры, телеобъективы, конденсоры).

#### **Список литературы:**

1. Т.С. Ровенская Т.С., А.Е.Алимов, К.Е. Квиткина. *Инженерный журнал: наука и инновации*, вып. 2(2014). URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/1209.html>

### **APLANATIC SPHERICAL LENS WITH AXIAL LINEAR DISTRIBUTION OF THE REFRACTIVE INDEX**

**Rovenskaya T.S, Kvitkina K. E.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Discussed method of calculation, design and monochromatic aberration properties of spherical aplanatic lens with axial linear distribution of the refractive index as an alternative to aspherical aplanatic lens with a homogeneous refractive index.

# ДИФРАКЦИОННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Крюкова К.А., Животовский И.В.

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия  
Дифракционные ответвители

Данная работа носит обзорный характер и посвящена дифракционным методам ответвления части пучка излучения и измерение мощности и углового положения оси пучка.

Для точного определения дальности и углового положения объекта используют лазерные локационные системы. В таких системах, работающих на больших дальностях, используется мощное лазерное излучение ИК-диапазона спектра, которое необходимо контролировать с высокой степенью точности. Для этого используют системы автоюстировки (см. рис. 1) на основе маркерного источника. Для работы системы автоюстировки необходим согласованный отвод излучений рабочего лазера и маркерного источника, который может осуществляться различными методами.

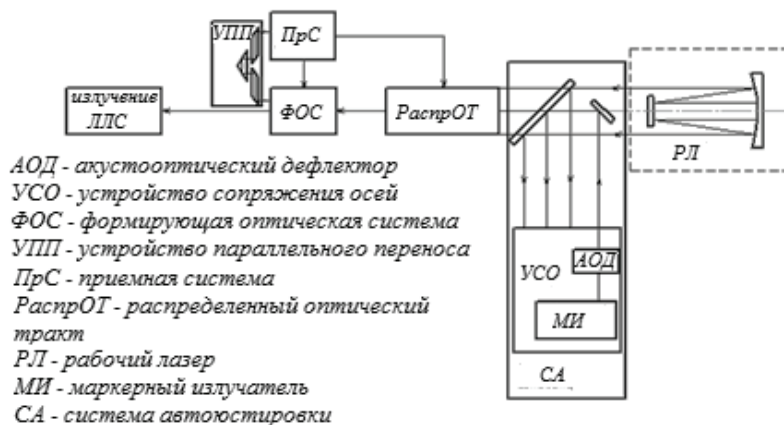


Рисунок 1.

Функциональная схема лазерной локационной системы с системой автоюстировки

Одним из таких способов отвода излучения является использование плоскопараллельной пластины.

В качестве материалов для изготовления светоделительных пластин обычно используются ZnSe, ZnS, CaF<sub>2</sub>, LiF и другие.

Достоинством данного метода является простота и легкость реализации данной схемы измерения. Недостатком данного метода отвода излучения является то, что плоскопараллельная пластина работает в проходящем мощном излучении. Необходимо учитывать лучевую прочность материалов и покрытий плоскопараллельных пластин и термооптические эффекты, ухудшающие качество проходящего пучка рабочего лазера.

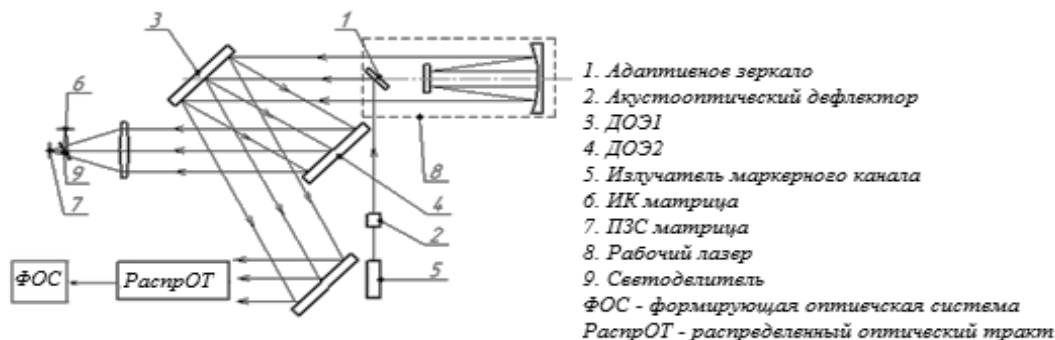
Другим косвенным методом измерения параметров излучения является использова-

ние дифракционного ответвителя, который представляет собой фазовую дифракционную решетку (см. рис. 2).

Коэффициент отвода излучения от n-го порядка рассчитывается:

$$K_{\text{он}n} = \frac{I_n}{I_{\Sigma}}$$

где  $I_n$  - интенсивность излучения в n-ом порядке,  $I_{\Sigma}$  - интенсивность дифрагировавшего излучения от всех порядков.



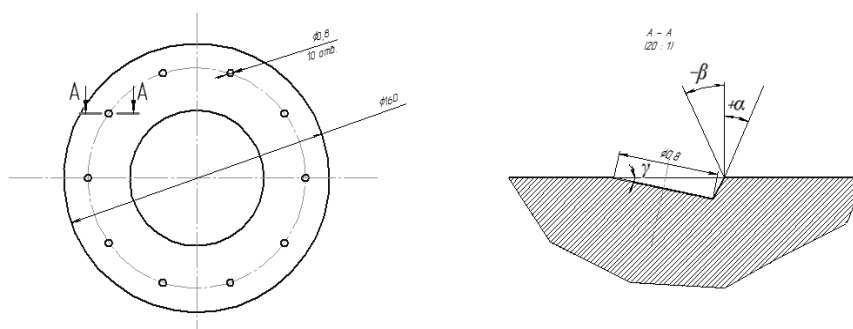
**Рисунок 2.**

Функциональная схема ответвителя части пучка рабочего лазера на основе двух дифракционных оптических элементов (ДОЭ)

Так, например, для угла дифракции  $\beta \approx 14...16^\circ$  коэффициент отвода для  $n = -4$  порядка от одного ДОЭ составляет  $K_{\text{он}-4} = 3,197 \cdot 10^{-3}$ .

Достоинства данного метода ответвления - линейность угловой ориентации дифрагированного излучения, достижение требуемого коэффициента отвода излучения и малый коэффициент потерь. Недостатками данного метода являются сложность в эксплуатации и юстировки, сложность изготовления дифракционных оптических элементов.

Еще одним способом ответвления излучения является использование металлического зеркала с дополнительными зеркальными элементами, расположенными под определенным углом (см. рис. 3).



**Рисунок 3.**

Геометрическая модель, состоящая из зеркала с дополнительными зеркальными элементами для отвода силового излучения

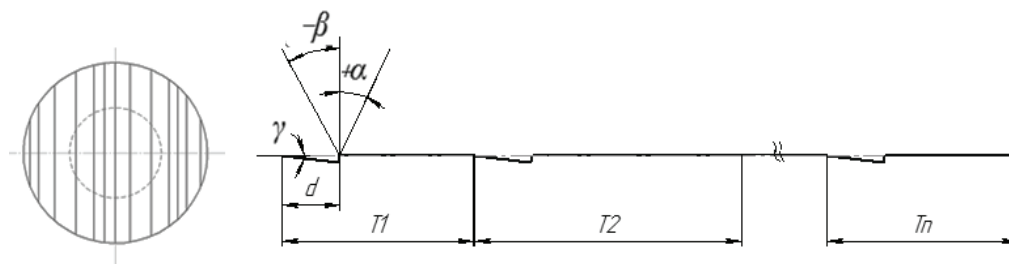
Достоинствами такой системы являются неселективность к спектральному составу рабочего лазера и возможность достижения требуемого коэффициента отвода. Недостатком такой системы являются локальные зоны отвода излучения, и как следствие, потеря

информации об излучение, а также технологическая сложность изготовления данного ответвителя

Решением проблемы технологичности изготовления предыдущего ответвителя является аperiodический дифракционный оптический элемент, который показан на рис.4.

Достоинствами данного метода являются неселективность к спектральному составу рабочего лазера и возможность достижения требуемого коэффициента. Недостаток – локальные зоны отвода излучения.

Другой метод отвода силового излучения – ответвитель на основе струны, используемый для измерения мощности отведенной части излучения.



**Рисунок 4.**

Геометрическая модель аperiodического дифракционного оптического элемента:

$\alpha$  – угол падения;  $\beta$  – угол дифракции;  $\gamma$  – угол блеска;

$d$  – размер штриха;  $T_1, T_2, T_n$  – периоды дифракционной решетки

Данный метод измерения силового излучения имеет недостатки: требуются дополнительные расчеты по определению стойкости струны к излучению, необходимость сканирования струной всего сечения пучка, что приводит к задержке при измерениях. Достоинства: возможность получения требуемого коэффициента отвода, минимальное влияние на структуру пучка, прошедшего излучение.

Наиболее оптимальным методам ответвления лазерного излучения считается метод ответвления на основе двух дифракционных оптических элементов, так как достигается требуемый коэффициент отвода излучения, малый коэффициент потерь и реализуется требуемый угол дифракции.

#### Список литературы:

1. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В. Система измерения углового рассогласования осей рабочего лазера и маркерного источника на основе дифракционных оптических элементов. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/sistema-izmereniya-uglovogo-rassoglasovaniya-osey-rabocheho-lazera-i-markernogo-istochnika-na-osnove-difraktsionnyh-opticheskikh> (дата обращения 14.03.2016).

2. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, I. V. Zhivotovskii, V. E. Karasik, V. Ya. Mendeleev “Experimental Analysis of Instrumental Uncertainty in the Measurement Channel of an Optoelectronic System for Monitoring Surfaces of Complex Shape” Measurement Techniques 2015. Vol. 57. n. 12. P. 1371-1377. «Экспериментальный анализ инструментальной погрешности измерительного канала оптико – электронной системы контроля поверхностей сложной формы».

3. Бобров С.Т., Грейсух Г.И., Туркевич Ю.Г. Оптика дифракционных элементов и систем. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, с. 223, (1986).

4. Карасик В.Е., Орлов В.М. Локационные лазерные системы видения: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 8, (2013).



5. V. Ya. Mendeleev "Influence of orientation of rough grooves on spectral reflectivity of a surface in the thermal radiation wavelength range" High Temperature 2016 vol. vol. 54 n. 3 p. 349-355 «Влияние ориентации канавок шероховатости на спектральный коэффициент отражения в диапазоне длин волн теплового излучения».

6. Крюкова К.А., Животовский И.В. Дифракционные ответвители для системы измерения мощности и угловой ориентации оси пучка силового излучения, Молодёжный научно-технический вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, 7, (2016).

## **DIFFRACTION COUPLERS ARE USED WITH SYSTEM OF MEASUREMENT OF POWER AND ANGULAR ORIENTATION OF THE AXIS OF THE BUNCH OF LASER RADIATION**

**Kryukova K.A., Jivotovskiy I.V.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## **МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНЫХ ЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

**Пискунов Т.С., Барышников Н.В., Животовский И.В.**

Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Проанализированы методы и средства обеспечения точностных характеристик лазерных локационных систем в условиях внешних механических воздействий. Разработана методика экспериментальных исследований устройств параллельного переноса и функциональная схема лабораторной установки. Разработан эталонный зеркально-призмный блок с погрешностью параллельного переноса менее 0,1 угл.сек.

Проектирование систем дистанционного лазерного зондирования является активно развивающимся направлением в технике. К таким системам относятся лазерные оптико-электронные системы (ЛОЭС): лазерные локационные станции (ЛЛС), лидары и дальнометры. Они позволяют решать актуальные задачи измерения скорости, дальности и угловых координат объектов, а также изучения химического состава среды [1,5].

При разработке, сборке и юстировке многоканальных ЛОЭС возникает задача линейного смещения лазерного пучка на значительные расстояния, сохраняя информацию об угловом направлении его оси. Для этого необходимо либо сохранить угловое направление оси смещаемого пучка, либо сохранить информацию о его угловом направлении в параметрах смещённого пучка. Устройства, позволяющие решить данную задачу, называются устройствами параллельного переноса пучка лазерного излучения (УПП) [1,4]. Используя такое устройство, можно обеспечить согласование углового положения осей передающего и приемного каналов системы.

Функциональная схема УПП должна содержать два основных блока: зеркально-призмный блок и блок измерения угловых координат. Основной и наиболее трудоёмкой задачей при проектировании УПП является экспериментальная оценка погрешности параллельного переноса, вносимой зеркально-призмным блоком.

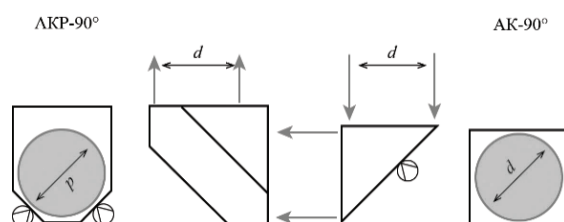
Выделим ряд задач, которые необходимо решить при проведении исследований экспериментального образца зеркально-призмного блока. Для осуществления измерений необходимо иметь согласованные с высокой точностью приёмный и передающий каналы. Понятно, что измерения, проводимые в приёмном канале, являются относительными – координаты пучка излучения передающего канала, прошедшего зеркально-призмный блок, назначаются нулевыми в начале эксперимента. После этого в качестве измеренных угловых координат выступает разница текущих координат и нулевых.

Однако, в случае исследования зеркально-призмных блоков, осуществляющих косвенные измерения, например, на основе пентапризм, нулевые координаты не могут быть получены с помощью этого же устройства. В таком случае предварительную взаимную юстировку приёмного и передающего каналов можно осуществить следующими способами:

1. С помощью точной механической юстировки.
2. С помощью откалиброванного зеркально-призмного блока.
3. С помощью единого приёмо-передающего устройства.

При необходимости исследования зеркально-призмного блока, осуществляющего перенос на расстояния  $a > 0,5$  м перечисленные недостатки делают нецелесообразным использование этих способов юстировки. В таком случае возникает задача проектирования эталонного зеркально-призмного блока для калибровки оптических осей приёмного и передающего каналов, который обладает такой же простотой использования, как и откалиброванный зеркально-призмный блок, однако лишён недостатка в сложности конструкции.

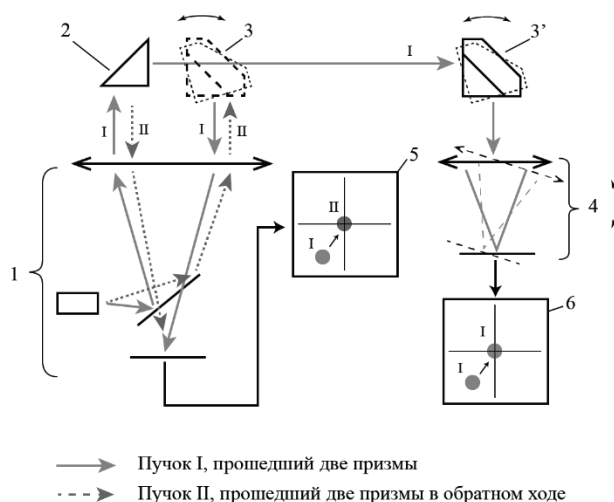
Подобное устройство может быть получено с использованием двух призм – АР-90° и АКР-90° (рис. 1), в совокупности работающих как призма БКР-180°, которая, как известно, является идеальным световозвращателем.



**Рисунок 1.**

Схема опτικο-механического устройства калибровки – эталонного зеркально-призмного блока

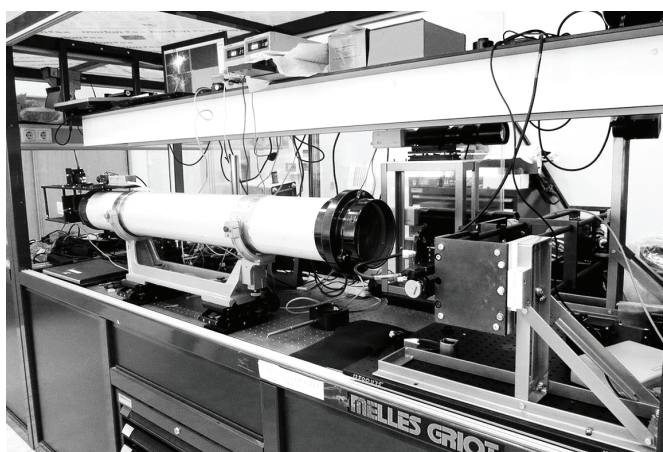
На рис. 2 показан способ калибровки приёмного и передающего каналов экспериментальной установки с помощью разработанного устройства. Была разработана математическая модель эталонного зеркально-призмного блока и было показано, что теоретически его погрешность параллельного переноса может быть менее 0,1 угл.сек. в лабораторных условиях [2,3].



**Рисунок 2.**

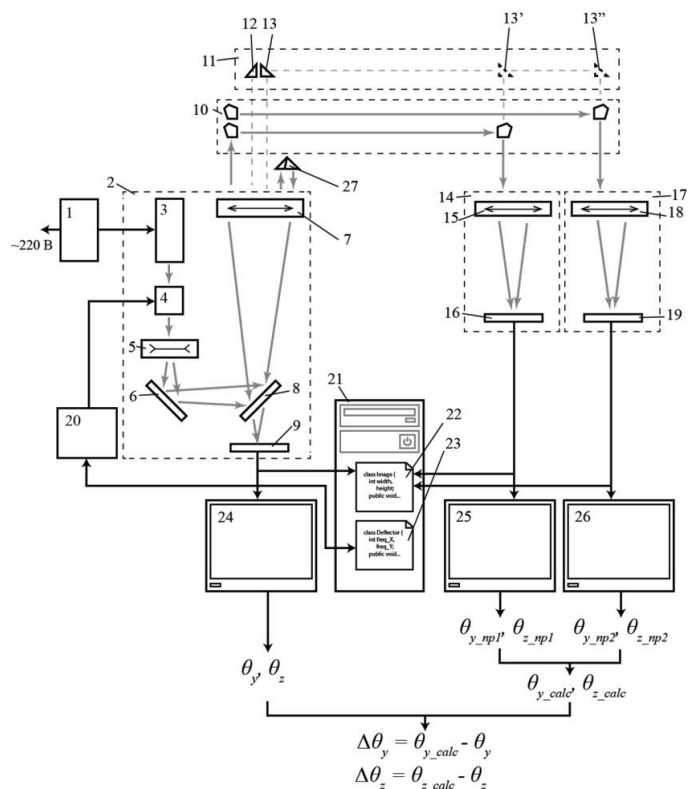
Способ калибровки приёмного и передающего каналов экспериментальной установки:  
 1 – цифровой автоколлиматор, состоящий из объектива, источника излучения, светоделителя и МФПУ; 2 – призма АР-90°; 3 – призма АКР-90° в первом положении; 3' – призма АКР-90° во втором положении; 4 – объектив и МФПУ приёмного канала; 5 – изображение с МФПУ автоколлиматора в первом положении призмы; 6 – изображение с МФПУ приёмного канала

Результатом проведённой разработки является обобщённая функциональная схема экспериментальной установки. На рис. 3 показан лабораторный макет установки, имитирующая приёмный и передающий каналы. На рис. 4 показана её функциональная схема. В качестве источника излучения используется цифровой автоколлиматор 2, состоящий из лазера 3, который включается с помощью блока питания 1, дефлектора 4, объектива 5, служащего для формирования пучка нужной расходимости, полупрозрачной пластины 8 и длиннофокусного объектива 9. Излучение, вернувшееся в автоколлиматор, проходит обратно через полупрозрачную пластину 8 и регистрируется на МФПУ. Приёмный канал состоит из одной или нескольких видеокамер 14, 17. Перед автоколлиматором может устанавливаться эталонный зеркально-призменный блок 11 и исследуемый блок 10.



**Рисунок 3.**

Установка, имитирующая приёмный и передающий каналы



**Рисунок 4.**

Обобщённая функциональная схема экспериментальной установки

для исследования точностных характеристик зеркально-призменного блока УПП:

- 1 – блок питания лазера; 2 – цифровой автоколлиматор; 3 – лазер; 4 – дефлектор; 5 – объектив; 6 – юстировочное зеркало; 7 – объектив; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – МФПУ; 10 – исследуемый зеркально-призменный блок; 11 – эталонный зеркально-призменный блок; 12 – АР-90; 13 – АКР-90; 14, 17 – видеокамеры приёмного канала; 15, 18 – объективы; 16, 19 – МФПУ; 20 – драйвер дефлектора; 21 – персональный компьютер; 22 – программа цифровой обработки изображений; 23 – программа управления дефлектором; 24 – монитор МФПУ автоколлиматора; 25 – монитор видеокамеры 14; 26 – монитор видеокамеры 17; 27 – уголкового отражатель

Разработанная методика исследования точностных характеристик и методика юстировки элементов экспериментальной установки позволяют с высокой точностью соотнести теоретически рассчитанные характеристики с действующей моделью зеркально-призменного блока УПП, в том числе и на основе пентапризм. Использование лазера и дефлектора в имитации передающего канала максимально приближают экспериментальные исследования к реальным установкам, таким как устройство сопряжения оптических осей приёмного и передающего каналов с помощью маркерного лазера.

#### Список литературы:

1. В.М. Орлов, В.Е. Карасик. *Лазерные системы видения*. - Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000.
2. Барышников Н. В., Животовский И. В., Пискунов Т. С. *Исследование влияния угловых аберраций объектива оптико-электронного координатора на погрешности измерения взаимного углового рассогласования осей лазерных пучков*. - Наука и образование: электронное научно-техническое издание. - 2012. - № 11. - С. 23.

3. Барышников Н. В., Животовский И. В., Пискунов Т. С., Платонов П. В. *Исследование устойчивости работы системы автоюстировки с устройством параллельного переноса, построенным на основе пентапризм*. - Метрология – приложение к журналу «Измерительная техника». - 2012. - №12.

4. Барышников Н.В. *Разработка и исследование устройств параллельного переноса пучка излучения для систем автоюстировки каналов лазерных локационных станций*. - Измерительная техника. - 2011. - № 4. - стр. 65-70.

5. N. V. Baryshnikov, D. G. Denisov, I. V. Zhivotovskii, V. E. Karasik, V. Ya. Mendeleev «Experimental Analysis of Instrumental Uncertainty in the Measurement Channel of an Optoelectronic System for Monitoring Surfaces of Complex Shape» Measurement Techniques 2015. Vol. 57. n. 12. P. 1371-1377. «Экспериментальный анализ инструментальной погрешности измерительного канала оптико – электронной системы контроля поверхностей сложной формы»

## **METHODS AND DEVICES FOR ACHIEVING PRECISION OF THE LASER LOCATION SYSTEMS WORKING IN UNSTABLE ENVIRONMENT WITH VIBRATIONS**

**Piskunov T.S., Baryshnikov N.V., Zhivotovskiy I.V.**  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**ПУБЛИКАЦИЯ СТАТЕЙ  
В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ЖУРНАЛЕ  
«КОНТЕНАНТ»**



**Редакция научно-технического журнала  
«Контенант»  
публикует статьи авторов-участников  
научно-технической конференции  
«Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении»,  
написанных по результатам докладов**

*Требования к статьям изложены на сайте [www.contenant.ru](http://www.contenant.ru) в разделе  
«Контенант» – научно-технический журнал и в настоящем Сборнике тезисов.*

*Сбор статей для публикации в журнале «Контенант» производится  
до 18 ноября 2016 года по электронной почте E-mail: [book@contenant.ru](mailto:book@contenant.ru)*

*Статьи будут размещены в журналах № 3 и № 4 одновременно.*

*Авторы статей должны прислать свои домашние адреса  
для отправки им готовых журналов.*

Президент академии «Контенант»

Б.Н.Сеник



## ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ В ЖУРНАЛЕ «КОНТЕНАНТ»

На электронный адрес редакции «Контенант» E-mail: [book@contentant.ru](mailto:book@contentant.ru) должны быть направлены: авторский оригинал статьи (на русском языке) с названием статьи, краткая аннотация, ключевые слова, сведения об авторе (авторах), с указанием названия предприятия, организации, электронный адрес автора (авторов).

Объем статьи не должен превышать двадцать страниц, в программе Word: размер шрифта 14, гарнитура - Times New Roman, межстрочный интервал 1,5, поля - 2,5 см со всех сторон.

Для выделения текста используется *курсив* и **жирный шрифт**.

**Краткая аннотация** статьи объемом 5-10 строк раскрывает поставленную задачу, основные результаты и выводы.

**Ключевые слова** приводятся в количестве от 3 до 5.

Публикуемые сведения об авторе представляются на каждого автора научной статьи:

1. Фамилия, имя, отчество (полностью).
2. Ученая степень, ученое звание.
3. Место работы, должность.
4. E-mail, телефоны (желательно «мобильный»).
5. Авторы, не члены академии «Контенант», для получения авторских экземпляров журнала по почте должны указать адреса с почтовым индексом, на которые желают получить журнал.

Пункты 4, 5 не подлежат публикации.

**Иллюстрации** (фотографии, рисунки, схемы, графики, диаграммы, карты) необходимо представлять отдельным файлом в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 DPI. В тексте должны присутствовать ссылки на иллюстрации. Иллюстрации нумеруются и сопровождаются подписями.

**Таблицы** набираются тем же шрифтом, что и основной текст, но меньшего размера (кегель 12, допускается снижение кегля до 9 пункта).

На каждую таблицу в тексте делается ссылка. Слово «таблица» в тексте печатается сокращенно («табл.»), а над таблицей полностью.

Таблицы сопровождаются заголовками.

Название граф таблицы печатается с прописной буквы, а подчиненные со строчной.

Если таблица размещена вдоль страницы, её следует разместить заголовком к левому краю. Если цифровые данные в некоторых графах таблицы не приводятся, то в графе ставится прочерк. Если таблица имеет продолжение, то её название не повторяется, а над таблицей следует писать «Продолжение таблицы» и её номер.

В тексте статьи и подрисуночных подписях не допускаются сокращения слов (кроме общепринятых, ГОСТ Т.12-77 ...).

**Формулы** должны быть набраны в редакторе формул программы Word. Перенос формул допускается на знаках «плюс» и «минус», реже на знаках «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей статье арабскими цифрами). Номер формулы заключать в круглые скобки у правого края страницы.

Отсканированные версии иллюстраций, таблиц и формул не допускаются.

Список литературы оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008.

Использованная автором литература приводится после статьи в порядке упоминания. Ссылки на Internet-ресурс приводятся в общем списке литературы по автору или заглавию публикации с обязательным указанием адреса сайта, где эта публикация размещена и датой её размещения или датой последней проверки наличия ресурса.

**В тексте ссылки нумеруются** в квадратных скобках. В статье рекомендуется использовать не более 15 источников.

Редакция оставляет за собой право отказать в публикации при несоответствии статьи требованиям содержания и направленности журнала с письменным извещением автора, подписанным главным редактором.

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

Сборник тезисов докладов  
Всероссийской научно-технической конференции  
«Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении»

Материалы представлены в авторской редакции

ПАО «Красногорский завод им. С.А.Зверева»  
2016

Зак. 2016.09-1477