

### КОНТЕНАНТ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 3, 2018

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

#### Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке Лицензионный договор № 727-11/2014

#### Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

#### СОДЕРЖАНИЕ

Барышников Н.В., Карасик В.Е., Мухина Е.Е. Научно-педагогическая школа лазерного и оптико-элек- тронного приборостроения в МГТУ им. Н.Э. Баумана		
Янченко Г.О., Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э. Аберрационный анализ оптических систем акустооптиче- ских изображающих спектрометров	11	
<b>Люй П.Ц., Бодров С.В.</b> Зеркально-линзовый компенсатор для контроля формы вогнутых асферических поверхностей астрономических зеркал	16	
Ровенская Т.С. Применение практико-ориентированной учебной деятельности при подготовке специалистов по расчету изображающих оптических систем	22	
Аникьев А.А., Калинин А.В. Статистические аспекты принятия решений при распозна- вании цели по нескольким спектральным каналам	30	
Илюхин И.М., Белокуров Е.А. Анализ динамики процесса наведения управляемого объ- екта на высокоскоростную воздушную мишень	38	
Алексейченко А.А., Вереникина Н.М., Пономарев А.П. Инклинометр на базе трех лазерных гироскопов		
Откупман Д.Г., Тимашова Л.Н. Синтез панорамного объектива тепловизионной системы среднего ИК-диапазона спектра	47	
Белов М.Л., Всякова Ю.И., Городничев В.А., Назаров В.В., Михайловская М.Б.		
Анализ влияния типа нефти на характеристики обнаружения лазерным методом нефтяных загрязнений на водной поверхности	55	
Степанов К.В., Борисова А.В., Жирнов А.А., Чернуцкий А.О., Нестеров Е.Т., Пнев А.Б.	55	
Изучение влияния статистики флуктуаций длины волны узкополосных лазерных источников на показания измерительных систем	61	
Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Дроздова Е.А., Бестин А.Ю.		
Возможности создания голограммных оптических элемен- тов жидкостного травления кремниевых пластин	69	
Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Бугорков К.Н., Попов В.В.		
Возможности метода плазмохимического травления опти- ческого стекла для создания функционального микроре- льефа	75	



### КОНТЕНАНТ

ISSN: 2307-5767

Том 17, № 3, 2018

#### НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования Зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке Лицензионный договор № 727-11/2014

#### Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)	
Одиноков С.Б., Ковалев М.С., Соломашенко А.Б., Град Я.А., Николаев В.В., Соколов Г.В., Швецов И.А. Оптические приборы визуального наблюдения и целеука- зания на основе голограммных элементов	
Качурин Ю.Ю., Каратеева А.А., Скляров С.Н. Модель призмы Пехана Пк-0 и ее использование при ана- лизе оптической системы в программе Zemax в последо- вательно-непоследовательном режиме	;
Тарабрин М.К., Бушунов А.А., Лазарев В.А., Карасик В Е., Козловский В.И., Свиридов Д.И., Коростелин Ю.В., Фролов М.П., Скасырский Я.К. Разработка двухступенчатого метода создания микро- структур на поверхности монокристалла CdSSe с помо- щью фемтосекундной лазерной абляции и плазмохимиче-	
ского травления <b>Томилов С.М., Тарабрин М.К., Лазарев В.А., Карасик В.Е.</b> Твердотельный лазер на кристалле Cr <sup>2+</sup> :ZnSe среднего ИК-диапазона с синхронизацией мод на основе полупро- водникового зеркала с насыщающимся поглощением	
Воропаев В.С., Донодин А.И., Воронец А.И., Лазарев В.А., Тарабрин М.К., Карасик В.Е., Крылов А.А. Волоконный кольцевой тулиевый лазер с пассивной син- хронизацией мод с управлением суммарной нелинейно- стью и дисперсией резонатора	1
Донодин А. И., Воропаев В. С., Лазарев В. А., Тарабрин М. К., Карасик В. Е. Метод постройки частоты повторения импульсов фем- тосекундного волоконного эрбиевого лазера с помощью пьезоэлемента	1
<b>Устинов Д.В., Тарабрин М.К., Лазарев В.А., Карасик В. Е.</b> Перспективный непрерывный твердотельный лазер на кристалле Cr <sup>2+</sup> :CdSe	1
Вербицкий А.В., Янев А.С., Лазарев В.А., Вереникина Н.М. Лабораторный стенд на базе твердотельного Nd³+:YAG ла- зера с изменяющимися параметрами накачки и геометрии резонатора	1
Сушков А.Л. О нормировках начальных параметров первого и второ- го вспомогательных лучей при расчёте коэффициентов аберраций Зейделя в программах OPAL, OSLO, Zemax	1
Барышников Н.В., Животовский И.В., Карасик В.Е., Сахаров А.А. Метод измерения формы оптических деталей приборами на основе датчиков волнового фронта	1
Мартынова Д.К., Гладышева Я.В., Барышников Н.В. Анализ погрешностей алгоритма абсолютной калибровки для высокочастотных неоднородностей	1



### ФАКУЛЬТЕТ «РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА»

ЭЛЕКТРОННЫЕ



# научно-терагогической школе

*NA3CPHO20* 

и оптико-электронного

приборостроения

МГТУ им. Н.Э.Баумана

#### НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА ЛАЗЕРНОГО И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ В МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА

#### БАРЫШНИКОВ Н.В., КАРАСИК В.Е., МУХИНА Е.Е.

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

E-mail: baryshnikov@bmstu.ru

**Аннотация:** В работе приводятся исторические данные об образовании и развитии оптикоэлектронного направления в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приводятся не только хроникальные события, библиографические данные основателей направления, но и история формирования развития как учебных, так и научных составляющих этого направления. Отдельно показывается современное состояние учебно-научного направления в Университете.

**Ключевые слова:** оптико-электронное приборостроение, кафедра, научно-образовательный центр, направление обучения.

#### SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL SCHOOLS OF LASER AND OPTO-ELECTRONIC ENGINEERING IN THE BAUMAN MOSCOW STATE TECHNICAL UNIVERSITY

#### N.V. BARYSHNIKOV, V.E. KARASIK, E.E. MUKHINA

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow

E-mail: baryshnikov@bmstu.ru

**Abstract:** The paper provides historical data on the education and development of the opto-electronic department at the Bauman MSTU. N.E. Bauman. Not only chronicle events, bibliographic data of the department founders, but also the history of the development of both educational and scientific components of this department are presented. Separately, the modern state of the educational and scientific department at the University is shown.

Keywords: optical-electronic engineering, faculty, scientific and educational center, field of education.

Научно-педагогическая школа лазерного и оптико-электронного приборостроения зародилась в МГТУ им. Н.Э. Баумана (МВТУ) восемьдесят лет назад в 1938 году, когда была организована кафедра «Оптико-механические приборы» (ОМП). Её создание было обусловлено бурным развитием оптической промышленности и потребностью в инженерах-оптиках, специализирующихся в области проектирования и производства оптических приборов. Первым заведующим кафедрой ОМП был крупный учёный оптик, профессор И.А. Турыгин (1904 -1966 гг.). Большую помощь в организации и

становлении кафедры оказали ведущие учёные и специалисты оптической промышленности: профессора С.И. Фрейберг (главный инженер Главка Наркомата оборонной промышленности), генерал-майор ИТС проф. М.М. Русинов (создатель известных во всём мире широкоугольных объективов типа «Руссар») и другие учёные и специалисты оптической промышленности. С 1943 г. по 1947 г. кафедрой заведовал профессор С.Т. Цукерман.

В 1947 г. на базе кафедры ОМП были созданы две кафедры: «Производство оптических приборов» и «Теория оптических приборов». Первую возглавил профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР С.И. Фрейберг (1887-1957 гг.) – крупный специалист в области производства оптических приборов, вторую – профессор И.А. Турыгин.

С 1957 по 1988 г. кафедру «Производство оптических приборов» возглавлял доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР Л.П. Лазарев (с 1957 г. кафедра называлась «Оптические приборы», с 1961 г. – «Оптико-электронные приборы»).

С 1988 г. по 2000 г. заведующим кафедрой был доктор технических наук, профессор, Заслуженный работник высшей школы России Г.М. Мосягин (с 1998 г. кафедра называется «Лазерные и оптико-электронные системы» - РЛ2).

С 2000 г. по 2011 г. кафедрой руководил доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии РФ В.И. Козинцев.

Ниже приводятся биографии заведующих нашей кафедры.





#### Турыгин Иван Афанасьевич (1904 г. - 1966 г.)

Выдающийся оптик, крупнейший специалист в области оптического производства, основатель научной школы оптического приборостроения. В 1927 г. окончил Ленинградский техникум точной механики и оптики (впоследствии ЛИТМО) по специальности инженер-оптик. С 1932 г. доцент ЛИТМО. С 1937 г. – начальник КБ, затем главный инженер Красногорского оптико-механического завода. В 1938 г. Турыгин организовал кафедру «Оптико-механические приборы» МГТУ (тогда МММИ им. Н.Э. Баумана). Заведовал кафедрой с 1938 по 1947 гг. Профессор (1955 г.). С 1947 г. по 1966 г. - заведующий кафедрой «Теория оптических приборов» МВТУ (теперь РЛ-3). Декан факультета «Приборостроение» МВТУ им.Н.Э. Баумана (1960-1966 гг.)

#### Фрейберг Сергей Иванович (1887 г. -1957 г.)

Крупный ученый-оптик и руководитель оптической промышленности, профессор (1939 г.). Окончил Санкт-Петербургский Технологический институт (1914 г.). Технический директор Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (1930-1933 гг.), технический директор Ленинградского оптико-механического завода. Главный инженер 9-го Главного Управления Оборонной промышленности с 1937 г., главный инженер 2-го Главного управления Наркомата вооружения (1937-1947 гг.) С 1945 г. профессор, с 1947 г. по 1957 г. – заведующий кафедрой «Производство оптических приборов» (теперь РЛ-2) МВТУ им. Н.Э. Баумана. Крупный специалист по сборке и юстировке оптических приборов. Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.





#### Лазарев Леонид Павлович (1914 г. - 1999 г.)

Крупный ученый, создатель научной школы МГТУ по оптико-электронному и лазерному приборостроению. Окончил МВТУ в 1940 г. В 1941-1946 гг. – декан факультета. В 1946 г. защитил кандидатскую, в 1955 г. докторскую диссертацию. С 1946 г. по 1953 г. – заместитель директора МВТУ по учебной работе. Профессор (с 1956 г.) Лазарев Л.П. заведовал кафедрой П2 ныне - РЛ-2 с 1957 по 1988 гг. С 1959 по 1964 гг. был ректором МВТУ. С 1988 по 1999 гг. работал Главным научным сотрудником в НИИ «Радиоэлектроники и лазерной техники» и был советником Ректората. Лауреат Государственной премии СССР. Инициатор практически всех научных направлений, развивающихся на кафедре РЛ-2 и в НИО-3 НИИ РЛ, крупный организатор высшего образования. Автор более 300 научных трудов и 20 изобретений.

#### Мосягин Геннадий Михайлович (1932 г. – 2011 г.)

Окончил с отличием МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1956 г. Работал в НПО «Геофизика». После окончания аспирантуры в 1964 г. защитил кандидатскую диссертацию. В 1986 г.защитил докторскую диссертацию, профессор (1989 г.). С 1988 по 2000 гг. заведовал кафедрой РЛ-2, внес большой вклад в ее развитие, в том числе поставил и читал ряд новых специальных дисциплин, в 1998 г. на кафедре открыта новая специальность «Лазерная техника и лазерные технологии». Имеет более 180 научных трудов (в том числе две монографии, 14 учебников, 16 изобретений), подготовил 20 кандидатов технических наук. Заслуженный работник высшей школы Российской федерации.

#### Козинцев Валентин Иванович (1945 г. – 2013 г.)

Окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. После окончания аспирантуры и защиты кандидатской диссертации в течение 15 лет работал в НПО «Зенит» Министерства электронной промышленности, где под его руководством было создано новое научно-техническое направление – исследование и разработка лидаров для дистанционного контроля окружающей среды, промышленно освоены шесть образцов лидаров различного назначения. Лауреат Государственной премии РФ в области науки (1989 г). В 1988 г. защитил докторскую диссертацию. С 1989 г. – зам. директора НИИ «Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ, с 2000 по 2011 гг.– заведующий кафедрой РЛ-2. Научный руководитель многих НИР и ОКР, автор более 200 научных работ, в том числе трех монографий и более 30 патентов на изобретения.

Учебный процесс с самого начала основания кафедры РЛ-2 опирался на её научно-исследовательские работы и был тесно связан с ведущими оптическими предприятиями.

В 40-е годы начали развиваться два научных направления: оптическое моделирование объектов, быстроперемещающихся в пространстве и разработка на его основе исследовательских, и испытательных стендов и авиационных тренажёров (руководитель Л.П. Лазарев) и управление процессами обработки оптических поверхностей для обоснования проектирования серийных автоматизированных технологических процессов производства сферических и асферических оптических поверхностей (руководитель М.Н. Семибратов).

По первому направлению в работах принимали участие Е.Н. Лебедев, В.Н. Дикарев, И.И. Пахомов, В.А. Перов, Б.Ф. Петин. Выполнение теоретических и экспериментальных работ привело к созданию в МВТУ им. Н.Э. Баумана оптического моделирующего стенда «Лупа». В состав стенда вошли кабина летчика, пульт инструктора и вычислительная машина для расчета аэродинамики полета самолета в процессе моделирования воздушного боя. На его базе ряд авиаприборостроительных предприятий разработали и запустили в серийное производство авиационные тренажёры для подготовки летчиков самолета-перехватчика МиГ-19П, которые длительное время эксплуатировались в воинских частях.

С начала 60-х годов в связи с интенсивным развитием инфракрасной (ИК) техники на кафедре под руководством профессора В.Н. Дикарева проводились научно-исследовательские работы по изучению влияния мощного ИК-излучения аэродинамически нагретых обтекателей, тепловых головок самонаведения (ТСГ) высокоскоростных управляемых реактивных снарядов на их помехозащищённость и точность наведения.

Результаты НИР - разработка инженерных методик расчёта температурных полей обтекателей ТГС, создание лабораторного стенда для нагрева обтекателей в реальном времени, разработка методов автоматизированного проектирования ТГС, обеспечивающих устранение или значительное ослабление влияния помех от нагретых элементов конструкции.

С начала 60-х годов под руководством профессора Л.П. Лазарева начинаются работы по новому научному направлению, связанному с исследованием и разработкой лазерных оптико-электронных приборов и систем, в результате которых на кафедре был создан один из первых в СССР гелий-неоновый лазер.

Следует отметить, с этого же времени на кафедре РЛ-1 (П-9) под руководством проф. А.М. Кугушева (группа В.Н. Рождествина) также начались НИР по лазерному направлению. Сотрудники двух кафедр работали в тесном контакте, дискутируя друг с другом, учась друг у друга. Дальнейшее развитие этого направления на кафедре РЛ-1 проводится под руководством профессора В.Н. Рождествина.

В 70-е годы коллектив сотрудников кафедры под руководством профессора Л.П. Лазарева приступил к исследованию эффекта световозвращения лазерного зондирующего излучения и возможности его технического использования при создании систем пеленгации и идентификации оптических и оптико-электронных приборов. Результатом проведённых в течение более 20 лет работ стало создание признанного в стране научного направления. Полученные научные результаты и технические решения позволили создать и внедрить в серийное производство лазерные оптико-электронные системы новых типов, основанные на использовании эффекта световозвращения и обеспечивающие обнаружение и идентификацию типов инспектируемых оптических и оптико-электронных приборов.

За эти работы профессору Л.П. Лазареву в 1985 г. была присуждена Государственная премия СССР, профессора И.И. Пахомов и В.Е. Карасик были награждены орденами СССР, а молодые сотрудники кафедры Г.И. Уткин, А.Ф. Ширанков, М.В. Горохоров и Н.Л. Терещенко получили премию Ленинского Комсомола. Дальнейшие работы по данному научному направлению проводятся под руководством профессора В.Е. Карасика.

С начала 70 годов под руководством Л.П. Лазарева, а затем Г.М. Мосягина при участии В.Б. Немтинова, В.Я. Колючкина, В.Н. Рязанова проводились научноисследовательские работы по разработке автоматизированной оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) для контроля параметров и характеристик оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС), работающих в широком диапазоне длин волн, а также методов автоматизированного проектирования ОЭПиС. В результате были разработаны теоретические основы объективных методов контроля, оЭПиС, изготовлены опытные образцы автоматизированной аппаратуры контроля, а также пакеты прикладных программа для автоматизированного проектирования ОЭПиС. А учебник «Теория оптико-электронных систем», авторы – Г.М. Мосягин, В.Б. Немтинов, Е.Н. Лебедев (1980 г.) удостоен первой премии МГТУ.

С начала 70-х годов под руководством профессора М.Н. Семибратова, а затем доцента Ю.В. Сальникова проводили НИР по разработке технологических процессов изготовления оптических элементов космических оптико-электронных приборов. В работах участвовали А.В. Подобрянский, В.А. Перов. Б.З. Быков, А.А. Ефремов, В.В. Горшков, М.Н. Семчуков, А.Д. Седова. Итогом стала разработка технологии изготовления крупногабаритных асферических оптических деталей, моноблоков лазерных гироскопов, а также методов и приборов контроля их основных параметров и характеристик.

В начале 80 годов под руководством профессора Л.П. Лазарева, а затем профессора О.В. Рожкова велись НИР по созданию систем оптической обработки информации. В работах принимали участие В.Б. Немтинов, В.С. Щетинкин, С.Б. Одиноков, А.П. Тимашов, Н.М. Вереникина, Л.Н. Тимашова, А.Н. Щербаков, А.М. Горелов, И.Н. Спиридонов, Т.М. Волосатова и др. Полученные научные результаты и технические решения позволили разработать и изготовить макеты фурье-процессоров и оптикоэлектронных нейропроцессоров и исследовать их характеристики.

В 80-х годах под руководством доцента А.С. Гоменюк проводились НИР, связанные с разработкой нового типа спектральной оптической аппаратуры, с использованием лазерно-акустического эффекта в газах, жидкостях и твёрдых веществах. В работах принимали участие В.И. Алехнович, В.Б. Пясецкий, В.О. Шайдуров, В.П. Жаров. В результате выполнения НИР были разработаны методики проектирования лазерных фотоакустических оптико-электронных приборов для медицины, химии, экологии.

Важно отметить, что именно в те годы был сформирован и фирменный стиль работы кафедры. Этот стиль, основанный на высоком профессионализме, ответственности, коллективизме, всегда позволял кафедре быть в первых рядах и выполнять самые сложные поручения руководства университета.

Пережив 90-е годы, кафедра сохранила свой научный потенциал, значительно омолодила состав. Да, мы порой шутим, что на кафедре работают «деды» и «внуки». Но мы не упустили такой важный аспект, как преемственность поколений. И такие имена как, Е.Н. Лебедев, В.Н. Дикарев, М.Н. Семибратов, Н.К Кривяков, имя руководителя кафедры Л.П. Лазарев – для нас всегда являются образцом профессионализма, отношения к делу, к коллективу кафедры.

В 2000-х годах сформированы новые научные направления, среди которых надо выделить:

- создана и оснащена современной техникой учебно-научная лаборатория «Оптико-

голографических систем». В лаборатории проводятся лабораторные и научно-исследовательские работы, связанные в первую очередь с исследованием защитных голограмм с кодированными скрытыми изображениями. Заслуга в формировании этого научного направления принадлежит профессору С.Б. Одинокову;

и сследование методов и алгоритмов распознавания человека по двумерным (2D) и трёхмерным (3D) изображениям лица и разработка оптико-электронных систем видеонаблюдения со сверхширокими полями зрения (руководитель профессор В.Я. Колючкин);

 исследование и разработка методов и перспективных лазерных систем для дистанционного контроля объектов и состояния окружающей среды (руководитель профессор М.Л. Белов);

 исследование и разработка лазерных систем видения для обнаружения, селекции и идентификации оптических и оптико-электронных систем и диффузно отражающих объектов в широком диапазоне длин волн (руководитель проф. В.Е.Карасик);

 – разработка методик расчета и проектирования современных оптических систем формирования лазерного излучения, высокоточных нашлемных систем, светодиодных осветительных комплексов повышенной эффективности (руководители проф. И.И. Пахомов и доцент А.Ф. Ширанков).

– разработка элементной базы техники ночного видения на основе нанотехнологий и технологий сверхвысокого вакуума (руководитель профессор кафедры РЛ-2, зам. генерального директора по научной работе НПО «Геофизика НВ» Ю.К. Грузевич). За цикл этих работ в 2003 г. авторскому коллективу (в составе - Ю.К. Грузевич) присуждена Государственная премия РФ в области науки.

 – разработка методов и аппаратуры высокоточного контроля формы и качества оптических поверхностей крупногабаритных оптических деталей (руководитель доцент Д.Г. Денисов).

Важно отметить, что по этим направлениям ведутся НИР и ОКР:

 на кафедре создана многофункциональная учебно-научная лазерно-оптическая лаборатория, оснащённая современной уникальной оптико-электронной аппаратурой.
 Лаборатория позволяет проводить на самом высоком научно-методическом уровне учебный процесс и научно-исследовательские работы по новым научным направлениям лазерной техники;

– в 2011-2012 гг. По поручению руководства университета сотрудники кафедры принимали участие в создании уникального Научно-образовательного центра «Фотоники и ИК техники» (директор – профессор кафедры РЛ2 В.Е. Карасик). Созданный центр – один из лучших в университете. Его открывал Президент России Д.А. Медведев. В его лабораториях развиваются новые научные направления – микрооптоэлектромеханических систем, терагерцовой оптотехники, волоконной и фемтосекундной техники, акустооптических систем. Там работают молодые сотрудники, и мы гордимся тем, что основу их составляют наши магистры и аспиранты.

Сейчас в стране идет сложный процесс реформы высшего образования. Кафедра участвует в этом процессе по всем направлениям. Мы готовим бакалавров и магистров по направлениям «Оптотехника», и «Лазерная техника и лазерные технологии», ведем обучение по направлению специалитета «Электронные и оптико-электронные приборы специального назначения». В процессе этой работы обновляются существующие курсы, и появляются новые такие, как курсы по цифровой обработке оптических сигналов, «Распознавание образов в оптико-электронных приборах», «Автоматизация проектирования оптико-электронных приборов», «Современные проблемы фотоники и ИК-техники», «Волоконные технологии и информационно-измерительной технике», «Прикладная голография». Эти курсы пользуются большим интересом среди студентов.

Мы проводим модернизацию технологического цикла, включая и модернизацию лабораторного практикума. Создана новая специализация «Оптические системы лазерных и оптико-электронных приборов», которая включает новые курсы, построенные на основе наших лучших научных достижений: «Численные методы в оптике», «Лазерная оптика», «Математическое моделирование в современной оптике», «Методы и приборы контроля качества оптических поверхностей».

Такая динамика развития является характерной особенностью нашей кафедры. Это движение невозможно без наших контактов с коллегами по вузовской науке. Кафедра «Оптико-электронных приборов» МИИГАИКа, ИТМО, методическое объединение – это наши коллеги, друзья и соратники.

Мы всегда чувствовали и поддержку, и участие предприятий оптико-механической промышленности. ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», АО «Лыткаринский завод оптического стекла», АО «НПО «Орион», НПО «Оптика», ПАО «НПО «Алмаз», АО «НПК «Системы прецизионного приборостроения», ОАО «Геофизика-HB», НПО, АО «КБ Точмаш им. А.Я. Нудельмана», – это наши стратегические партнеры, совместные работы с которыми позволяют нам участвовать в перспективных НИОКР, готовить молодые кадры, как для кафедры, так и для предприятий. Объединяющей площадкой для нашей совместной работы стала общественная научно-техническая академия «Контенант», членами которой являются ведущие специалисты промышленности и преподаватели ВУЗов. Академия организует и проводит ежегодные научно-технические конференции, ведет издательскую деятельность. От лица коллектива кафедры выражаем благодарность академии за предоставленную возможность выпуска журнала «Контенант», посвященного юбилею нашей кафедры.

За период своего существования кафедра РЛ-2 подготовила более 4000 инженеровоптиков, более 160 кандидатов и более 30 докторов технических наук. В настоящее время понятие кафедра РЛ2 подразумевает целую учебно-научную структуру, включающую саму кафедру, лабораторию «Оптико-голографические системы», НОЦ «Фотоника и ИК техника», НИИ Радиоэлектроники и лазерной техники. Эта структура оснащена самой современной техникой, высококвалифицированными специалистами, способными решать самые сложные научно-техническое и учебно-методические задачи.

Каждый год наши студенты удостаиваются именных стипендий - Президента и Правительства РФ, премий на конкурсах научных работ студентов, проводимых в Университете и в стране. Ежегодно наша сборная добивается побед на оптических олимпиадах!

И сегодня, поздравляя коллектив кафедры с 80-летним юбилеем, хочется пожелать сотрудникам доброго здоровья, новых творческих успехов в нашем важном деле – в подготовке и воспитании высококвалифицированных специалистов-оптиков.



# АБЕРРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

ЯНЧЕНКО Г.О.,1 БАТШЕВ В.И.,1,2 МАЧИХИН А.С.,2,3 ПОЖАР В.Э.1,2

<sup>1</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН

<sup>3</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ»

**E-mail:** batshev\_vlad@mail.ru

Аннотация: Статья посвящена моделированию акустооптических фильтров и анализу оптических аберраций, возникающих при акустооптическом взаимодействии, в различных схемах изображающих спектрометров: в схеме с параллельным ходом лучей через акустооптический фильтр, в конфокальной схеме, а также в схеме, где акустооптический фильтр расположен в сходящихся пучках лучей. Во всех представленных схемах фильтр выполнен из одноосного кристалла парателлурита. Результаты аберрационного расчета представлены в зависимости от геометрических параметров акустооптического кристалла.

Ключевые слова: акустооптический перестраиваемый фильтр, аберрации, изображающий спектрометр.

#### ABERRATION ANALYSIS OF THE ACOUSTOOPTIC SPECTRAL IMAGING DEVICES

YANCHEKO G.O.,<sup>1</sup> BATSHEV V.I..<sup>1,2</sup> MACHIKHIN A.S.,<sup>2,3</sup> POZHAR V.E.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

#### E-mail: batshev\_vlad@mail.ru

**Abstract:** This work is devoted to the modeling of acoustooptical tunable filters and the analysis of optical aberrations arising in the acoustooptic interaction in various schemes of imaging spectrometers: in a scheme with a collimated beam path through an acoustooptic filter, in a confocal scheme, and in a scheme where an acoustooptic filter is located in converging beams. In all the presented schemes, the filter is made of a uniaxial paratellurite crystal. The results of the aberration analysis are presented depending on the geometric parameters of the acousto-optic crystal.

Keywords: acousto-optic tunable filter, aberrations depicting spectrometer.

#### ВВЕДЕНИЕ

Акустооптические (АО) фильтры находят все более широкое применение в области спектральной визуализации объектов (spectral imaging) [1,2], в спектральной фильтрации интерферирующих световых пучков [3], где крайне важно получение высококачественных, неискаженных изображений, и в других областях. Ключевым фактором, ограничивающим возможности АО приборов, являются аберрации, возникающие при АО взаимодействии. Существуют работы, посвященные исследованию отдельных факторов, ограничивающих качество АО изображающих систем, например, [4-7], но подробная классификация аберраций АО элементов представлена лишь в [8]. Данная статья является продолжением исследований, выполненных в статье [8]. Исследования выполнены методом компьютерного моделирования, анализа и оптимизации оптических систем изображающих АО спектрометров в программе ZEMAX с использованием представленной в [8,9] модели АО кристалла. Модель представляет собой две призмы из материалов с показателями преломления, соответствующими состояниям поляризации волны до и после дифракции, разделенные условной плоскостью дифракции. Преломление лучей в этой плоскости происходит не по закону Снеллиуса, а по формулам, представленным в [10]. В дальнейшем на схемах, представленных на рис. 1, 3 и 5, условная плоскость дифракции показана вертикальной штриховой линией внутри АО кристалла; горизонтальные пунктирные отрезки символизируют звуковые волны.

#### АБЕРРАЦИИ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

Специфическими аберрациями АО фильтра являются: спектральный дрейф, хроматизм положения, дисторсия, наклон изображения, астигматизм. Для АО фильтров, изготовленных из парателлурита, спектральный дрейф, проявляющийся как смещение изображения поперек оптической оси, может достигать 10-20% поля зрения. Дисторсия является несимметричной и приводит к тому, что объект в виде квадрата изображается криволинейной трапецией. Кроме того, в разных системах АО спектрометров могут возникать и другие аберрации, например, хроматизм положения, который не скажется на качестве монохроматического изображения, однако проявится в виде расфокусировки при перестройке АО фильтра по длине волны [8].

Рассмотрим три основных схемы изображающих АО спектрометров, показанные на рис. 1, 3, 5. Они отличаются по тому, где расположено промежуточное изображение по отношению к АО фильтру: в бесконечности, внутри фильтра или на конечном удалении от него. Системы состоят из идеальных входной Л<sub>1</sub> и выходной Л<sub>2</sub> линз, АО кристалла, размещенного между скрещенными поляризаторами П<sub>1</sub> и П<sub>2</sub> и матричного приемника излучения М. Линзы Л, и Л<sub>2</sub> выбраны идеальными, чтобы показать лишь аберрации, которые вносит АО фильтр. АО ячейка изготовлена из одноосного кристалла ТеО<sub>2</sub>. Угловая апертура 2ω внутри кристалла составляет 2°, диаметр входного зрачка 10 мм, длина взаимодействия АО составляет 10 мм. Фокусные расстояния линз равны 50 мм. Передняя грань АОС перпендикулярна направлению распространения падающего света. Параметр Ө (ориентация кристаллографических осей АО ячейки) в каждой из представленных схем менялся от 0 до 85° с шагом 5°. При каждом значении в выполнялась оптимизация системы спектрометра на минимум аберраций. Для минимизации аберраций были выбраны два переменных параметра: угол наклона выходной грани АО кристалла В и угол наклона приемника изображения х. Остаточные аберрации оптимизированных систем в зависимости от параметра в представлены на рис. 2, 4, 6. Дисторсия на графиках обозначена символом «Д», спектральный дрейф – «СД», хроматизм положения «ΔS», астигматизм – «ΔZ»; «R» означает радиус пятна рассеяния.

#### АБЕРРАЦИИ ФИЛЬТРА, УСТАНОВЛЕННОГО В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПУЧКАХ ЛУЧЕЙ

В схеме с параллельным ходом лучей через АО фильтр (рис. 1) присутствуют лишь хроматический сдвиг и дисторсия [8].



Схемы спектрометров с АО фильтром, расположенным в параллельных пучках: a) – с сохранением направления оптической оси; б) – с минимальным значением спектрального дрейфа

Чаще всего на практике используется схема, показанная на рис. 1а, в которой направление оптической оси сохраняется за счет соответствующим образом выбранного угла наклона β выходной грани АО кристалла. Такая схема проста с конструктивной точки зрения, но не оптимальна с точки зрения аберраций.

Как показано в [5], спектральный дрейф может быть устранен за счет наклона выходной грани АО кристалла. Этот факт полностью подтверждается расчетами, выполненными с использованием разработанной нами модели АО фильтра. Рис. 1б иллюстрирует схему, в которой угол β<sub>AXP</sub> выбран из условия минимизации спектрального дрейфа.

На рис. 2а представлены значения спектрального дрейфа изображения (в процентах от величины изображения); на рис. 26 – значения дисторсии. На рис. 2в показаны значения углов β и β<sub>АХР</sub> в схемах на рисунках 1а и 16 соответственно. Сплошной линией показаны аберрации, соответствующие рисунку 1а, штриховой – рисунку 1б.

#### АБЕРРАЦИИ В КОНФОКАЛЬНОЙ СХЕМЕ

В схеме с конфокальным ходом лучей, показанной на рис. 3, спектральный дрейф и дисторсия отсутствуют [8]. Это обусловлено тем, что плоскость промежуточного изображения находится в области дифракции излучения внутри АО кристалла, значит область дифракции (условная плоскость дифракции) проецируется на приемник излучения. Однако другие виды аберраций присутствуют.



Рисунок 2.

Результаты моделирования системы с параллельным ходом лучей через АО фильтр: значения спектрального дрейфа (a), дисторсии (б) и угла β (в) в зависимости от параметра θ



Рисунок 3. Конфокальная схема АО спектрометра

Наибольшее влияние будет оказывать хроматизм положения, который зависит только от длины АО кристалла и дисперсии его материала. Монохроматические аберрации малы, поэтому качество изображения в случае идеальных линз Л<sub>1</sub> и Л<sub>2</sub> близко к дифракционному уровню.

На рис. 4а представлен график зависимости пятна рассеяния от параметра θ. Видно, что для всех конфигураций АО кристалла радиус пятна рассеяния на превышает 4 мкм, что не превосходит дифракционный предел; радиус кружка Эйри при вышеуказанных параметрах АО фильтра для длины волны 0,55 мкм составляет 7 мкм. Рис. 4б иллюстрирует значения углов β и χ, при которых удалось достигнуть такую степень коррекции аберраций.

Хроматизм положения на графиках аберраций не представлен, т.к. он в рассматриваемой системе постоянный и не зависит от варьируемых параметров; его значение равно ΔS = 0,25 мм. Это существенная величина, но она не влияет на качество изображения, т.к. изображение в каждый момент времени формируется в узком спектральном интервале. Влияние хроматизма сказывается при перестройке по длине волны и проявляется в виде расфокусировки системы. Компенсировать это влияние можно, например, соответствующим образом рассчитав линзу Л<sub>2</sub>.

#### АБЕРРАЦИИ ФИЛЬТРА, УСТАНОВЛЕННОГО В СФОКУСИРОВАННЫХ ПУЧКАХ ЛУЧЕЙ

В схеме, где АО фильтр расположен в сфокусированных пучках лучей (рис. 5) аберрации максимальны. Наибольшее влияние на качество изображения оказывает астигматизм. Хроматизм положения, как и в конфокальной схеме, не зависит от оптимизируемых углов β и χ и также равен ΔS = 0,25 мм. Дисторсия в системе практически отсутствует при любых θ.



Рисунок 4. Результаты моделирования конфокальной системы: значения радиуса кружка рассеяния (а), а также углов β и χ (б) в зависимости от параметра θ



Рисунок 4. Результаты моделирования конфокальной системы: значения радиуса кружка рассеяния (а), а также углов β и χ (б) в зависимости от параметра θ



Рисунок 6. Результаты моделирования конфокальной системы: значения спектрального дрейфа (a), радиуса кружка рассеяния (б), а также углов β и χ (в) в зависимости от параметра θ

Рис. 6 иллюстрирует результаты оптимизации рассматриваемой системы. Видно, что пятна рассеяния могут достигать значительных величин (порядка 100 мкм), что позволяет сделать вывод о том, что АО спектрометр, построенный по схеме на рис. 5, обладает наихудшим качеством изображения. Достоинством же его является отсутствие одной из линз (в данном примере – линзы Л<sub>2</sub>).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в работе исследований установлено, что:

- наилучшим качеством изображения обладает спектрометр с АО фильтром, размещенным в параллельных пучках лучей;

 в конфокальной системе качество изображения незначительно хуже, чем в системе с параллельным ходом лучей, однако отсутствуют дисторсия и спектральный дрейф;

- наихудшим качеством изображений обладает спектрометр, в котором АО фильтр расположен в сфокусированных пучках лучей. Однако эта система наиболее компактна и обладает наименьшим количеством оптических элементов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-07-00393 A).

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) [11].

#### Список литературы

1. *J. Bigio and S. Fantini*, Quantitative Biomedical Optics. Theory, Methods, and Applications (Cambridge University, 2016).

2. E. Dekemper, N. Loodts, B. Van Opstal, J. Maes, F. Vanhellemont, N. Mateshvili, G. Franssens, D. Pieroux,

*C. Bingen, C. Robert, L. De Vos, L. Aballea, and D. Fussen,* "Tunable acousto-optic spectral imager for atmospheric composition measurements in the visible spectral domain," Appl. Opt. 51, p. 6259–6267 (2012).

3. Мачихин А.С., Бурмак Л.И., Пожар В.Э. Визуализация фазовой структуры оптически прозрачных объектов на основе акустооптической фильтрации интерференционных изображений. // Приборы и техника эксперимента, 2016. № 6. С. 57-61.

4. Калинников Ю.К., Качарава А.Я., Поляков М.П. Иследование качества изображения акустооптического видеоспектрометра с акустооптическим перестраиваемым фильтром в неколлимированных пучках для БПЛА // Контенант, 2017. т. 16, №4. С. 27-33

5. *V. M. Epikhin and Y. K. Kalinnikov*, "Compensation of spectral drift of diffraction angle in noncollinear acousto-optic tunable filter," Tech. Phys. 59, p. 160–163 (1989).

6. *D. R. Suhre, L. J. Denes, and N. Gupta*, "Telecentric confocal optics for aberration correction of acousto-optic tunable filters," Appl. Opt. 43, p. 1255–1260 (2004).

7. Аникин С.П., Есипов В.Ф., Молчанов В.Я., Татарников А.М., Юшков К.Б. Акустооптический спектрометр изображений для астрофизических измерений // Оптика и спектроскопия, 2016, т. 121, №1. С. 124-132

8. *A. Machikhin, V. Batshev, and V. Pozhar,* «Aberration analysis of AOTF-based spectral imaging systems,» J. Opt. Soc. Am. A 34, p. 1109-1113 (2017)

9. Батшев В.И., Мачихин А.С., Пожар В.Э. Определение аберрационных характеристик оптических систем, содержащих акустооптические дифракционные элементы // Письма в журнал технической физики. 2017, выпуск 4. С. 72 – 79.

10. *V. Pozhar and A. Machihin*, "Image aberrations caused by light diffraction via ultrasonic waves in uniaxial crystals," Appl. Opt. 51, 4513–4519 (2012).

11. Центр коллективного пользования НТЦ УП APH. http://ckp.ntcup.ru (дата обращения 15.06.18)



#### ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫЙ КОМПЕНСАТОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ВОГНУТЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

#### ЛЮЙ П.Ц., БОДРОВ С.В.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: luypetr@yandex.ru, bodrov@bmstu.ru

**Аннотация:** В работе исследуются возможности компенсационных схем контроля формы поверхности крупногабаритных асферических зеркал, основанных на применении зеркально-линзовых компенсаторов. Рассмотрены известные схемы компенсационных систем, предложена новая схема зеркально-линзового компенсатора и разработана методика его расчета. Полученная компенсационная оптическая система для измерительной ветви интерферометра обладает более высокими коррекционными возможностями, по сравнению с аналогичными системами, и обеспечивает высокую точность контроля поверхности при относительной простоте конструкции.

Ключевые слова: интерферометр, асферическое зеркало, компенсатор.

#### MIRROR-LENS COMPENSATOR TO CONTROL THE SHAPE OF CONCAVE SURFACES OF ASTRONOMIC MIRRORS

#### LYU P.T., BODROV S.V.

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: luypetr@yandex.ru, bodrov@bmstu.ru

**Abstract:** The article is devoted to the investigation of possibilities of compensating surface shape control schemes for large-sized aspherical mirrors based on the use of mirror-lens compensators. Well-known schemes of compensator systems are considered, a new scheme of a mirror-lens compensator has been proposed, and a method for its calculating has been developed. The compensator optical system for an interferometer measuring branch has higher correction capabilities than comparable systems and provides high accuracy of surface control with relative simplicity of design.

Keywords: interferometer, aspherical mirror, compensator.

#### ВВЕДЕНИЕ

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области астрономии стали возможны благодаря появлению новых высокоточных телескопов. Эта отрасль науки и техники продолжает непрерывно развиваться, о чем свидетельствует строительство и ввод в эксплуатацию все новых обсерваторий. Для достижения высокого качества изображения в оптических схемах телескопов применяют асферические поверхности. Использование светосильных асферических зеркал с большой апертурой приводит к ужесточению требований, предъявляемых к рабочим поверхностям телескопов. Поэтому разработка высокоточных схем контроля формы астрономических зеркал является актуальной.

В связи с тем, что диаметры астрономических зеркал достигают нескольких метров, наиболее оптимальным является использование компенсационного метода контроля [1], который предусматривает использование в оптической схеме дополнительного оптического элемента — компенсатора, преобразующего плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий по форме с теоретической формой контролируемой поверхности (рис. 1). Достоинство данного метода заключается в том, что габариты компенсатора значительно меньше габаритов контролируемой детали, и он позволяет исследовать сразу всю контролируемую поверхность.

Подобные компенсаторы наиболее часто устанавливаются в измерительной ветви интерферометра Тваймана-Грина.

В настоящее время широко известен компенсатор Д.Т. Пуряева [2], состоящий из двух линз (рис. 2). В нем осуществляется раздельная компенсация сферической аберрации. Аберрация третьего порядка исправляется силовым компонентом – линзой 2, а высшие порядки исправляются изменением толщины менисковой линзы 1, внутри которой параксиальные лучи идут параллельно оптической оси.

Относительно недавно Н.А. Граф были предложены несколько схем новых зеркально-линзовых компенсаторов [3], предназначенных для контроля формы вогнутых асферических астрономических зеркал второго порядка. Оптическая схема этих систем представляет из себя двухкомпонентную зафокальную систему Мерсена с силовым линзовым элементом (рис. 3).



Рисунок 1. Схема компенсационного метода контроля: 1 – компенсатор; 2 – контролируемое зеркало



Рисунок 2. Компенсатор по схеме Пуряева





Рисунок 3. Зеркально-линзовые компенсаторы, предложенные Н.А. Граф: 1 – первый элемент зафокальной системы Мерсена, 2 – второй элемент зафокальной системы Мерсена, 3 – силовой линзовый элемент

Однако компенсаторы, предложенные Граф Н.А., имели существенный недостаток: расстояние между первым компонентом афокальной системы и линзой 3 (рис. 3) составляет около или более ста миллиметров. Этот факт не позволяет конструктивно объединить данные компоненты схемы в один узел.

В данной работе поставлена и решена задача синтеза компенсатора, компоненты которого конструктивно объединены в два узла. Первый узел объединяет силовую линзу и первый компонент афокальной системы, а другой является вторым элементом системы Мерсена.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО КОМПЕНСАТОРА

Наиболее простую оптическую схему имеет предфокальная система Мерсена, компоненты которой являются сферическими зеркалами. Однако ее коррекционные возможности ограничены и, как показали проведенные исследования, компенсатор, имеющий подобную схему, может быть использован для контроля зеркала с относительным отверстием не выше 1:10. Поэтому, для повышения относительного отверстия контролируемых поверхностей, оптическая схема компенсатора была усложнена путем замены сферического зеркала линзой Манжена на втором компоненте предфокальной системы Мерсена (рис. 4).

Контролируемое асферическое зеркало описывается следующими характеристиками:

D – диаметр контролируемого зеркала;

D<sub>0</sub> – диаметр отверстия в контролируемом зеркале;

r<sub>0</sub> – радиус кривизны при вершине контролируемого зеркала;



Рисунок 4. Схема предлагаемого зеркально-линзового компенсатора с линзой Манжена

е – эксцентриситет асферической поверхности.

При габаритном расчете исходного варианта компенсатора форма линзы Манжена может быть представлена выпукло-плоской, либо с равными радиусами кривизны.

В случае, если линза Манжена является выпукло-плоской со сферической отражающей поверхностью, исходными данными являются:

D<sub>к</sub> – максимальный диаметр компенсатора;

d<sub>1</sub> – осевое расстояние между компонентами афокальной части компенсатора.

Расчет начинается с вычисления значения коэффициента центрального экранирования с помощью следующей формулы:

$$\eta = \frac{D_0}{D}$$
.

Высоты первого вспомогательного луча на главных плоскостях поверхностей компенсатора будут равны:

$$h_1 = \frac{D_\kappa \cdot \eta}{2}$$
,  $h_3 = h_4 = h_5 = \frac{D_\kappa}{2}$ . (1)

Высота на второй поверхности компенсатора задается конструктором.

Углы первого вспомогательного луча находятся следующим образом:

Численное значение осевой толщины линзы Манжена определяется с помощью формулы

$$d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}$$
 .

Если полученное значение толщины нас не устраивает, то необходимо задать другое значение высоты и повторить вычисления.

Радиусы кривизны поверхностей афокальной части компенсатора вычисляются следующим образом:

$$r_1 = \frac{2h_1}{\alpha_2}$$
,  $r_3 = \frac{D_\kappa}{\alpha_3}$ ,  $r_2 = r_4 = \infty$ 

В случае, если линза Манжена в исходной системе имеет одинаковые радиусы кривизны  $(r_2 = r_3 = r_4)$ , то исходными данными, кроме  $D_k u d_1$ , является также осевая толщина линзы  $d_2$ . Высота  $h_1$  находится с помощью формулы (1).

А радиусы кривизны линзы Манжена определяются при решении уравнения четвертой степени:

$$A_1 r_2^4 + B_1 r_2^3 + C_1 r_2^2 + D_1 r_2 + E_1 = 0 \quad (2)$$

где:

$$\begin{split} A_1 &= n_4 q_2 q_{11} \ , \\ B_1 &= n_4 (q_2 q_{13} - q_{10} q_{11}) - q_{12} q_{18} \ , \\ C_1 &= n_4 (2q_7 q_{12} - 2q_8 q_{11} - q_{10} q_{13} - q_2 q_{15}) + q_{14} q_{18} \ , \\ D_1 &= n_4 (q_{10} q_{15} - 2q_7 q_{14} - 2q_8 q_{13}) + q_{16} q_{18} \ , \\ E_1 &= 2n_4 (q_8 q_{15} - q_7 q_{16}) \ . \end{split}$$

Предварительно вычисляются значения вспомогательных коэффициентов:

$$\begin{split} q_1 &= 2h_1d_1, \quad q_2 = -\frac{2h_1}{n_3}, \quad q_3 = \frac{n_3+1}{n_3}, \quad q_4 = q_3h_1, \quad q_5 = q_1q_3, \quad q_6 = q_1 + q_2d_2, \\ q_7 &= q_4d_2, \quad q_8 = q_5d_2, \quad q_9 = 2h_1 - q_4, \quad q_{10} = q_5 - 2q_6, \quad q_{11} = h_1 - \frac{D_\kappa}{2}, \\ q_{12} &= q_6 + q_2d_2, \quad q_{13} = q_9d_2 - q_7, \quad q_{14} = q_8 + q_{10}d_2, \quad q_{15} = 2q_7d_2, \quad q_{16} = 2q_8d_2, \\ q_{17} &= \frac{D_\kappa(1-n_4)}{2}, \quad q_{18} = n_4q_9 + q_{17}. \end{split}$$

Значение радиуса кривизны первого зеркала афокальной части компенсатора находится из выражения:

$$r_1 = \frac{q_{16} + q_{14}r_2 - q_{12}r_2^2}{q_{15} - q_{13}r_2 - q_{11}r_2^2}$$

Углы и высоты первого вспомогательного луча определяются с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned} & \alpha_2 = \frac{2h_1}{r_1}, \quad h_2 = h_1 - \frac{q_1}{r_1}, \quad \alpha_3 = \frac{q_2}{r_1} + \frac{q_4}{r_2} - \frac{q_5}{r_1 r_2}, \quad h_3 = h_1 - \frac{q_6}{r_1} - \frac{q_7}{r_2} + \frac{q_8}{r_1 r_2}, \\ & \alpha_4 = -\frac{q_2}{r_1} + \frac{q_9}{r_2} + \frac{q_{10}}{r_1 r_2} - \frac{2q_7}{r_2^2} + \frac{2q_8}{r_1 r_2^2} \end{aligned}$$

Аберрационные параметры ... для афокальной части компенсатора вычисляются следующим образом:

$$\begin{split} P_1 &= -\frac{\alpha_2^3}{4}, \quad P_2 = \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{(\mu_3 + 1)^2} (\alpha_3 \ \mu_3 + \alpha_2), \quad P_3 = \frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{4\mu_3^2} (\alpha_4 \ \mu_4 - \alpha_3 \ \mu_3), \\ P_4 &= -\frac{\alpha_4^3 \mu_4}{(1 - \mu_4)^2}, \quad \mu_3 = \frac{1}{n_3}, \quad \mu_4 = \frac{1}{n_4}. \end{split}$$

Затем по известной формуле [4] находится первая сумма Зейделя афокальной части компенсатора:

$$S_{I(1-4)} = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_3 P_3 + h_4 P_4$$

Первая сумма Зейделя контролируемого асферического зеркала будет равна:

$$S_{I(7)} = -De^2 \propto_7^3$$

где: е - эксцентриситет асферической поверхности;

 $\alpha_7 = -\frac{D}{2[r_0 + z(e^2 - 1)]}$  - угол наклона к оптической оси крайней нормали контролируемой поверхности;

z - стрелка прогиба поверхности асферического зеркала.

Для исправления сферической аберрации третьего порядка всей оптической системы первая сумма Зейделя силовой линзы компенсатора должна быть равна

$$S_{I(5-6)} = -\frac{2S_{I(1-4)} + S_{I(7)}}{2}$$

Значение угла «<sub>6</sub>, определяющего форму силовой линзы компенсатора, находится из решения следующего уравнения четвертой степени:

$$A_{2} \propto_{6}^{4} + B_{2} \propto_{6}^{3} + C_{2} \propto_{6}^{2} + D_{2} \propto_{6} + E_{2} = 0$$
(3)  
где:  $A_{2} = d_{5}\mu_{6}\delta_{2}$ ,  $B_{2} = \delta_{1} - \frac{\mu_{6}\delta_{2}D_{\kappa}}{2} - d_{5}\delta_{5}$ ,  $C_{2} = \frac{\delta_{5}D_{\kappa}}{2} + d_{5}\delta_{4}$ ,  
 $D_{2} = -(\frac{\delta_{4}D_{\kappa}}{2} + d_{5}\delta_{3})$ ,  $E_{2} = \frac{\delta_{3}D_{\kappa}}{2} - S_{I(5-6)}$ ,  
 $\delta_{1} = \frac{\mu_{6}D_{\kappa}}{2(\mu_{6}-1)^{2}}$ ,  $\delta_{2} = \frac{1}{(1-\mu_{6})^{2}}$ ,  $\delta_{3} = \alpha_{7}^{3}\delta_{2}$ ,  $\delta_{4} = \alpha_{7}^{2}\delta_{2}(2+\mu_{6})$ ,  
 $\delta_{5} = \alpha_{7}\delta_{2}(1+2\mu_{6})$ ,  $\mu_{6} = \frac{1}{n_{6}}$ .

d<sub>5</sub> – осевая толщина силовой линзы компенсатора, задаваемая конструктором.

С помощью формулы радиуса [4] находим радиусы кривизны поверхностей силовой линзы компенсатора и высоту первого вспомогательного луча на главных поверхностях второй поверхности этой линзы:

$$r_5 = \frac{D_{\kappa}(n_6-1)}{2n_6 \alpha_6}, \quad r_6 = \frac{h_6(1-n_6)}{\alpha_7 - n_6 \alpha_6}, \quad h_6 = \frac{D_{\kappa}}{2} - \alpha_6 d_5$$

Завершается расчет компенсатора вычислением расстояния между вершинами второй поверхности силовой линзы и контролируемого зеркала

$$d_6=\frac{h_6}{\alpha_7}-r_0$$
 .

#### ПРИМЕР РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРА

Характеристики контролируемого асферического зеркала:

 $r_0 = -48000$  мм, D = 6000 мм,  $D_0 = 750$  мм, e = 1.

Зададим диаметр компенсатора  $D_{\kappa} = 100$  мм и выбирем для линзы Манжена и силовой линзы стекло марки Ф1 (для  $\lambda$ =0,6328 мкм n = 1,60955).

Пусть линза Манжена является выпукло-плоской с отражающим слоем на выпуклой поверхности. Задаемся высотой h<sub>2</sub> и осевым расстоянием d<sub>1</sub>: d<sub>1</sub> = -180 мм, h<sub>2</sub> = 48,5 мм.

Тогда конструктивные параметры и первая сумма Зейделя афокальной части компенсатора будут равны:  $d_2 = -10,285882$  мм,  $r_1 = 53,254438$  мм,  $r_3 = 685,725445$  мм,  $S_{I(1-4)} = 0,4272881$ .

Значения первой суммы Зейделя контролируемого зеркала и силовой линзы составляют соответственно:  $S_{I(7)} = -1,46484375$ ,  $S_{I(5-6)} = -= 0,305133776$ .

При заданной осевой толщине силовой линзы компенсатора d<sub>5</sub> = 15 мм получим при решении уравнения (3) два действительных корня:

$$\alpha_{6(1)} = -0.039373239, \quad \alpha_{6(2)} = = 0.1128964.$$

При использовании первого корня уравнения  $\alpha_6 = -0,039373239$  конструктивные параметры компенсатора будут равны:  $r_5 = -480,920986$  мм,  $r_6 = -244,98861$  мм,  $d_6 = 48809,44958$  мм.

Возьмем второй корень уравнения  $\alpha_6 = 0,1128964$  и получим следующие значения конструктивных параметров:  $r_5 = 167,7238301$  мм,  $r_6 = 246,9982966$ ,  $d_6 = = 48772,90486$  мм.

Теперь рассчитаем компенсатор с линзой Манжена, имеющей равные радиусы кривизны. Зададим следующие исходные данные:

$$D_{\kappa} = 100$$
 мм,  $d_1 = -180$  мм,  $d_2 = -10$  мм,  $n_4 = -n_3 = 1,60955$ .

Решаем уравнение (2) и получаем значения радиусов кривизны афокальной части компенсатора  $r_2 = r_3 = r_4 = 435,220886$  мм,  $r_1 = 53,188377$  мм.

Тогда первая сумма Зейделя силовой линзы компенсатора будет равна:

$$S_{I(5-6)} = 0,584629119$$

Задаем толщину силовой линзы компенсатора также равной  $d_5 = 15$  мм. В этом случае, решая уравнение (3), получим следующие значения корней:  $\alpha_{6(1)} = -0.069685225$ ,  $\alpha_{6(2)} = 0.14377587$ .

При использовании первого корня уравнения  $\alpha_6 = -0,069685225$  конструктивные параметры компенсатора будут равны:  $r_5 = 271,7278535$  мм,  $r_6 = -178,1422144$  мм,  $d_6 = 48816,72445$  мм. Второй корень уравнения  $\alpha_6 = 0,14377587$  дает следующие значения конструктивных параметров:  $r_5 = 131,7009408$  мм,  $r_6 = 172,6490679$ ,  $d_6 = 48765,49379$  мм.

Таблица 1. Конструктивные параметры зеркально-линзового компенсатора в двойном ходе лучей

Радиусы кривизны поверхностей	Осевые расстояния	Марка стекла
54,918	-180	-воздух
172,346	-30	-Ф1
305,164	30	Φ1
172,346	180	воздух
164,881	10	Φ1
200,354	49348,691	воздух
-48000*	-49348,691	-воздух
200,354	-10	-Ф1
164,881	-180	-воздух
172,346	-30	-Φ1
305,164	30	Φ1
172,346	180	воздух
54,918		

Полученные в результате расчета по предложенной методике компенсаторы обладают достаточно большими значениями остаточной волновой аберрации, так как здесь не учитывалось влияние сферической аберрации высших порядков. Поэтому исходные варианты рассчитанных систем требуют оптимизации по волновому фронту. В качестве коррекционных параметров при оптимизации использовались кривизны поверхностей и осевые расстояния. Были заданы ограничения на световые высоты отражающих поверхностей зеркальных компонентов, толщины фокусирующей линзы и линзы Манжена. Были также поставлены условия сохранения автоколлимационного хода лучей через всю систему и афокальности зеркальной части компенсатора. Оптимизация всех рассмотренных выше вариантов дала близкие результаты. Конструктивные параметры одной из полученных систем приведены ниже в таблице.

Данная система обеспечивает контроль зеркала телескопа БТА с остаточной волновой аберрацией в двойном ходе лучей 0,0141λ, что составляет порядка λ/70.

Как показали исследования, подобные зеркально-линзовые компенсаторы позволяют контролировать вогнутые асферические зеркала с профилем поверхности как в виде эллипсоида, так и гиперболоида с квадратом эксцентриситета до 1,5.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была предложена и исследована новая схема зеркально-линзового компенсатора, в которой первые два компонента в виде сферического зеркала и линзы Манжена образуют предфокальную систему Мерсена. Разработана методика габаритного расчета и расчета в области аберраций третьего порядка, позволяющая получить конструктивные параметры исходной системы компенсатора и исправленной сферической аберрацией третьего порядка. Также была предложена и продемонстрирована его методика расчета. Конструкция компенсатора технологична и может быть реализована в виде двух простых узлов.

#### Список литературы:

1. *Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.* Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.

2. *Пуряев Д.Т.* Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.

3. Граф Н.А. Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал крупных оптических телескопов: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 183 с.

4. Заказнов Н.П. и др. Теория оптических систем: Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1992. 448с.

УДК 681.7; 372.8



#### ПРИМЕНЕНИЕ ПРАКТИКО – ОРИЕНТИРОВАННОЙ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАСЧЕТУ ИЗОБРАЖАЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

РОВЕНСКАЯ Т.С.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: rovts@yandex.ru

**Аннотация:** Обсуждается актуальность и важность развивающего и практико-ориентированного обучения студентов на современном этапе развития инженерного образования. Показана эффективность курсовых и научно-исследовательских работ и дипломного проектирования в качестве форм развивающего и практико-ориентированного обучения студентов в области проектирования и расчета оптических систем направлений специалитета (12.05.01) и магистратуры (12.04.02). Практическое применение этих форм показано на примере выполнения студентами проектных и исследовательских работ в области разработки высоко разрешающих широкоугольных светосильных ретрофокусных телеобъективов для различных спектральных областей. Приведены результаты работ.

**Ключевые слова:** инженерное образование, формы обучения, проектирование оптических систем, реверсивный телеобъектив.

#### THE USE OF PRACTICE – ORIENTED EDUCATIONAL ACTIVITIES IN TRAINING OF SPECIALISTS FOR THE CALCULATION DEPICTING OPTICAL SYSTEMS

#### ROVENSKAYA T.S.

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: rovts@yandex.ru

**Abstract:** The relevance and importance of developing and practice-oriented training of students at the present stage of development of engineering education is discussed. The efficiency of course and research works and diploma design as a form of developing and practice-oriented training of students in the field of design and calculation of optical systems directions of specialty (12.05.01) and master (12.04.02). The practical application of these forms is shown by the example of students design and research work in the field of development of high-resolution wide-angle light-aperture retrofocus telephoto lenses for various spectral regions. The results of the work are presented.

Keywords: engineering education, forms of training, optical systems design, reverse telephoto lens.

#### ВВЕДЕНИЕ

Стратегической задачей современного этапа развития высшего профессионального образования является формирование у выпускника ВУЗа в процессе его обучения полноценного комплекса технических, исследовательских и личностных компетенций специалиста в выбранной профессиональной области и способности к самостоятельной и творческой деятельности. Решение этой задачи требует усиления в образовательном процессе роли методов и форм развивающего и практикоориентированного обучения. К таким формам в техническом ВУЗе безусловно относятся курсовое и дипломное проектирование и научноисследовательская работа студента. Эффективность этих традиционных форм для решения сформулированных задач в существенной мере зависит от выбора объекта или темы проекта. Последние должны обеспечить осуществление проектных и исследовательских работ разного уровня, выполняемых студентом на протяжении всего цикла его обучения и объединенных конечной целью получения готового и инновационного продукта. В этом случае осуществляется последовательное продвижение от простых технических задач к более сложным с погружением в выбранную предметную область и обеспечивается вовлечение большего объема знаний и умений, приобретаемых в процессе освоения учебных дисциплин и практик. Тема должна быть актуальной, обладать инновационным потенциалом и иметь выраженную практическую направленность. Перспективным является привлечение к формулированию такой тематики предприятий – партнеров и потенциальных работодателей с оказанием с их стороны консультативной и технической поддержки.

#### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЕКТНЫХ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ФОРМ РАЗВИВАЮЩЕГО И ПРАКТИКО – ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ

Курсовое проектирование и научно- исследовательская работа студентов, обучающихся по программе специалитета, начинается на четвертом курсе обучения и имеет далее непрерывный характер. В качестве объекта проектирования для ряда студентов кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, специализирующихся в области проектирования и расчета оптических систем, был выбран широкоугольный светосильный ретрофокусный телеобъектив, предназначенный для работы с высокоразрешающими ПЗС-матрицами. Выбор этого класса оптических систем обоснован широким применением их в современных технических устройствах, реализацией схемных решений разного уровня технической и технологической сложности с возможностью инновационной деятельности [1]. В нем представлены светосильные объективы с относительным отверстием от D/f' = 1:0,95...1:1,2 с фокусными расстояниями f' в диапазоне 6...50 мм, работающие с приемниками излучения различных форматов (от 1/3" до 4/3") и в широком наборе спектральных диапазонов: УФ-, видимом (VIS 0,380 -0,800 мкм), видимом с расширением верхней границы в ближний ИК- (VisNIR 0,380 - 1,0 мкм), коротковолновом ИК - (SWIR 0,900 -

1,700 (2,500) мкм), средневолновом ИК- (MWIR 3,0-5,0 мкм); длинноволновом ИК-диапазонах (LWIR 8,0 - 14,0 мкм). К таким объективам с расширенными спектральными диапазонами помимо обеспечения высокого разрешения при высоких же значениях светосилы и углового поля предъявляются также специальные габаритные требования, в частности, требование обеспечения достаточной величины рабочего отрезка [1,2].

В процессе выполнения проекта студент осуществляет последовательное выполнение всех этапов профессионального проектирования оптических систем, соответствующих среднему уровню проектирования [3].

Необходимым этапом выполнения проекта является работа студента с информацией с целью изучения современного уровня технических решений и создания целевой рабочей базы. Студент выполняет аналитический обзор, используя данные научной и технической специализированной литературы, рекламной продукции и патентных ведомств ведущих стран, прежде всего США, Южной Кореи, Японии, ФРГ и РФ, с выделением функционально значимых технических решений, отражающих предельные достигнутые значения оптических и габаритных характеристик, оригинальные структурные схемы и используемую оптическую элементную базу. При этом студент получает практический опыт работы с информацией, обучается основам аналитики и систематизации и создает реально новый информационный продукт [2].

Выполнение обязательного в проектировании оптических систем этапа структурного синтеза (синтеза исходного варианта) требует от студента использования теоретических знаний по современным методам синтеза («методу расчета от аналога», классическому алгебраическому методу, аналитико-оптимизационному методу, системе композиционных методов и комбинации перечисленных методов [4 - 8]) и обоснованному выбору конкретного метода.

Анализ, оптимизация, оценка качества с применением различных функций (аберраций, функции концентрации энергии, оптической передаточной функции) и технологический анализ (определение влияния децентрировок поверхностей, линз и блоков линз и технологический анализ оптических элементов с асферическими поверхностями) осуществляются с применением теоретических знаний в области автоматизированного проектирования оптических систем и практического использования профессиональных ППП; в данном случае ОПАЛ (Россия) и ZEMAX (США).

Основной задачей проекта выпускницы кафедры Ламкиной Е.О. «Исследование схемы двухкомпонентного реверсивного телеобъектива» было создание математической расчетной модели объектива и исследование с помощью этой модели области решения. В результате был создан алгоритм математического моделирования и выполнено исследование двухкомпонентной структурной схемы объектива (рис. 1) в параксиальной области и области аберраций третьего порядка применительно к классу фотографических реверсивных телеобъективов с различными оптическими характеристиками в широкой и практически значимой области длины и коэффициента телереверсивности объектива. Результаты моделирования обеспечивают возможность на начальном этапе проектирования формулировать для компонентов объектива условия их аберрационной коррекции и определять вектор изменения его габаритных параметров для достижения требуемых показателей качества изображения.



Структурная схема двухкомпонентного реверсивного телеобъектива



Структурная схема трехкомпонентного реверсивного телеобъектива

В результате исследования области габаритных параметров был обоснован при создании компактных схем объективов переход к использованию в качестве первого (отрицательного) компонента объектива (рис. 1) двух компонентной конструкции типа реверсивного телекомпонента отрицательной оптической силы. В результате схема классического двухкомпонентного объектива трансформируется в трех компонентную по формуле квазителескопической двух компонентной системы («насадки») и силового положительного компонента (рис. 2).

Для схемы по рис. 2 рассмотрены два подхода к расчету внешних параметров трех компонентного реверсивного телеобъектива: 1) выполнение аберрационной коррекции объектива по методу взаимной компенсации аберраций насадкой и силовым компонентом; 2) синтез насадки и силового компонента как отдельных, аберрационно исправленных компонентов.

В результате проектирования был рассчитан суперкомпактный объектив с высоким значением коэффициента телереверсивности для расширенного спектрального диапазона 0.38 - 0.90 мкм с характеристиками: f'=16 мм; D/f'=1:2; размер линейного поля в пространстве изображений 11,04 мм; общая длина объектива 45.26 мм при заднем отрезке 10.66 мм. В связи со смещением рабочего диапазона в короткую область спектра студенткой были выполнены работы по созданию рабочих каталогов оптического стекла для указанного спектрального диапазона по данным каталогов фирм OHARA (Япония), SCHOTT (ФРГ) и LZOS (PΦ).

В проекте выпускника Леканова А.И. «Широкоугольный светосильный ретрофокусный объектив для матриц видимого диапазона формата ½"» в качестве исходного варианта использован ретрофокусный телеобъектив, построенный по формуле синтеза оптических систем композиционными методами из пяти сферических линз [6,7,11]: 1. Первая линза – широкоугольный элемент в котором первая поверхность апланатическая, вторая поверхность концентрична центру входного зрачка; 2. Вторая линза - коррекционный элемент, в котором обе поверхности концентричны центру входного зрачка; 3. Третья линза – базовый элемент, в котором первая поверхность апланатическая, вторая поверхность концентрична центру входного зрачка; 4. Четвертая линза светосильный элемент, в котором первая поверхность апланатическая, вторая поверхность концентрична центру входного зрачка; 5. Пятая линза – коррекционный элемент, в котором обе поверхности концентричны точке заднего фокуса; расположение апертурной диафрагмы – внутреннее (рис. 3). Характеристики объектива: фокусное расстояние f' = 4,5 мм; относительное отверстие D/f' = 1:1,8;угловое поле в пространстве предметов 2ω = 84°; спектральный диапазон (С – d – F); задний фокальный отрезок S', = 5,5 мм; по качеству изображения объектив может быть отнесен к геометрически-ограниченным оптическим системам. Объектив имеет две части; первая, образованная из двух оптических элементов с отрицательной оптической силой и расположенная до апертурной диафрагмы, развивает угловое поле объектива; вторая образует силовой компонент из трех положительных оптических элементов, расположенных после апертурной диафрагмы. В линзах использованы для положительных элементов стекла марки К8, для отрицательных элементов - стекла марки Ф1.

При анализе данного исходного варианта студентом осуществляется так называемое



Рисунок 3. Схема исходного объектива с показом хода лучей

«обратное» проектирование, позволяющее осмыслить теоретические положения композиционного метода и отработать практику реализации метода в среде актуальных профессиональных ППП. Изучение процесса синтеза и продукта синтеза способствует углубленному изучению метода и практическому освоению логики и особенностей собственно процесса синтеза и получаемого в итоге продукта.

В результате анализа структуры и качества объектива - прототипа были сформулированы проблемные для решения в процессе проектирования и исследования задачи: 1) исправление дисторсии; 2) существенное улучшение коррекции монохроматических и хроматических аберраций для получения качества изображения, определяемого размером пикселя ПЗС-матрицы (например, для камеры WinCamD-UCD12-1/2" СССD System).

Решение указанных задач определяет инновационное развитие исходной схемы. Для достижения сформулированных стратегических целей студентом были использованы различные методы и приемы развития схемы: оптимизация с сохранением основных структурных свойств, введение функциональных асферических оптических элементов, использование склеек для коррекции сферической аберрации, введение хроматических радиусов в качестве коррекционных элементов для осуществления хроматической коррекции осевого и внеосевых пучков, разделение силовой функциональной линзы на большее число линз, построение фронтальной широкоугольной части светосильного объектива в виде «каскада» афокальных систем с целью уменьшения дисторсии [6,7,12].

При расчете вариантов, реализующих указанные выше направления, студентом отрабатывались приемы работы в операциях структурного и аберрационного анализа, оценки качества изображения и оптимизации. Оптимизация каждого направления структурного решения сопровождается обоснованием создаваемой оптимизационной модели с оценкой качества полученного решения по функциям аберраций, геометрическим и СКВ размерам пятен рассеяния, МПФ, а также с проведением технологического анализа асферических поверхностей.

В результате сопоставительного анализа ряда синтезированных вариантов формируются выводы по структурной и логической схеме итогового варианта объектива. Рассчитанная оптическая система обеспечивает: фокусное расстояние 4,6 мм; задний фокальный отрезок 6,53 мм при общей длине 68 мм; относительное отверстие 1:1,85; угловое поле 84°. Полихроматическая МПФ в диапазоне C – d – F по уровню 0,3 определяется на частоте 330 мм<sup>-1</sup> в центре со снижением до 130 мм<sup>-1</sup> на краю кадра. Дисторсия на краю поля состав--0,74 %. Объектив содержит четыре ляет расположенные до апертурной диафрагмы на конечных расстояниях относительно друг друга одиночные линзы и три оптических элеменрасположенные за апертурной диафрагта мой на близких друг от друга расстояниях, из которых два – склеенные из двух линз. Первая и четвертая линзы имеют асферические вторые поверхности высшего порядка вида

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6 + \alpha_4 r^8$$

Оценка технологичности выполнена путем расчета разности стрелок для асферической поверхности и наилучшей сферы сравнения; максимальную глубину снятия материала: для первой линзы 0,665 мм, для четвертой линзы 0,066 мм.



Рисунок 4. Полихроматические ФПМ исходного объектива



Рисунок 5. Схема синтезированного объектива с показом хода лучей



Рисунок 6. Полихроматические ФПМ синтезированного объектива

На рис. 3, 4 представлены схема исходного объектива с показом хода лучей и кривые полихроматических ФПМ этого объектива, на рис. 5, 6 - схема синтезированного объектива с показом хода лучей и соответствующие ФПМ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполнение студентами проектных и исследовательских учебных работ обеспечило широкое использование, углубление и объединение теоретических знаний по предметным дисциплинам, приобретение практических навыков, необходимых на всех этапах процесса проектирования оптических систем, расширение профессионального кругозора, а также способствовало развитию творческих инициатив студентов, формированию логики и ответственности при принятии решений и выборе траектории действия. В результате происходит повышение мотивации студентов в выбранной профессиональной области. Одновременно практической и развивающей направленностью обучения обеспечивается непосредственно создание новых информационных, интеллектуальных и технических продуктов.

#### Список литературы:

1. Ровенская Т.С. Проблемы и тенденции в проектировании светосильного репродукционного объектива для микропроекции. Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. - вып.7. - URL:http:// engjournal.ru/catalog/pribor/optica/830.html.

2. Ровенская Т.С., Ламкина Е.О. Исследование структурных свойств нормальных и светосильных широкоугольных объективов. Инженерный журнал: наука и инновации. - 2013. - вып.7. - URL:http:// engjournal.ru/catalog/pribor/optica/829.html.

3. *Родионов С.А*. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982, 270 стр.

4. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969, 672 стр.

5. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчет и проектирование оптических систем. - М.: Логос, 2000, 584 стр.

6. *Русинов М.М*. Техническая оптика. Л.: Машиностроение, 1979, 488 с.

7. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Издательство: Эдиториал УРСС, 2011, 384 стр.

8. Грамматин А.П., Балаценко О.Н., Романова Г.Э. Расчет и автоматизация проектирования оптических систем. / Учебное пособие. - СПб: НИУ ИТМО, 2013, 128 стр.

9. Ровенская Т.С., Ламкина Е.О. Алгоритм аналитического исследования структурной схемы линзового двухкомпонентного реверсивного телеобъектива. – XIV международная научно – практическая конференция: «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». (Россия, г. Новосибирск, 14 – 15.08.2015г.). Международный научный институт «EDUCATIO» / Ежемесячный научный журнал. 2015, №7(14), стр. 54 – 58.

10. Ровенская Т.С., Ламкина Е.О. Моделирование линзового двухкомпонентного реверсивного телеобъектива на основе алгебраического метода расчета оптических систем. Наука и образование: Научное издание. – 2016, № 8, стр. 89 – 103. 11. Сальников А.В. Анализ проблем формирования компьютерной элементной базы композиции оптических систем: дис. ...канд. техн. наук. Санкт – Петербург. 2008. 98 стр. URL: http://www.dissercat.com/content/ analiz-problem-formirovaniya-kompyuternoi-elementnoibazy-kompozitsii-opticheskikh-sistem#ixzz5lb8Ah1An / (дата обращения 11.06.2018).

12. Фридман М.Р. Светосильный широкоугольный объектив. Патент РФ № 2123712. Дата публикации: 20.12.1998. URL: www1.fips.ru/ (дата обращения 12.06.2018).

#### List of references:

 Rovenskaya T.S. Problemy i tendencii v proektirovanii svetosilnogo reprodukcionnogo objektiva dlia mikroproekcii [Problems and trends in the design of light-aperture reproduction lens for micro-projection]. Engineering journal: science and innovation. – 2013.
 vol.7. - URL:http://engjournal.ru/catalog/pribor/ optica/830.html.

2. Rovenskaya T.S., Lamkina E.O. Issledovanie strukturnih svoistv normalnih i svetosilnih shirokougolnih objektivov [Study of the structural properties of normal and high-aperture wide-angle lenses]. Engineering journal: science and innovation. – 2013. - vol.7. -URL:http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/829.html.

3. *Rodionov S.A.* Avtomatizacia proektirovaniya opticheskih system [Automation of optical systems design]. L.: Engineering, 1982, 270 p.

4. *Slyusarev G.G.* Metody rascheta opticheskih system [Methods of calculation of optical systems]. L.: Engineering, 1969, 672 p.

5. *Zapriagaeva L.A., Sveshnikova I.S.* Raschet i proektirovanie opticheskih system [Calculation and design of optical systems]. M.; Logos, 2000, 584 p.

6. *Rusinov M.M.* Tehnicheskaya optika [Technical optics]. L.: Engineering, 1979, 448 p.

7. Rusinov M.M. Kompozitciya opticheskih sistem

[Composition of optical systems]. Publishing: Editorial URSS, 2011, 384 p.

8. *Grammatin A.P., Balatchenko O.N., Romanova G.E.* Raschet i avtomatizatciya proektirovaniya opticheskih system [Calculation and automation of optical systems design]. Textbook. – Spb: NIU ITMO, 2013, 128 p.

9. Rovenskaya T.S., Lamkina E.O. Algoritm analiticheskogo issledovaniya strukturnoi shemy linzovogo dvuhkomponentnogo reversivnogo teleobjektiva [Algorithm of analytical study of the structural scheme of a two-component lens reversing telephoto lens]. XIV international scientific and practical conference: «Scientific prospects of the XXI century. Achievements and prospects of the new century». (Russia, Novosibirsk, 14 – 15.08.2015). International scientific institute «EDUCATIO» / Monthly scientific journal. 2015, Nº7(14), p. 54 – 58.

10. Rovenskaya T.S., Lamkina E.O. Modelirovanie linzovogo dvuchkomponentnogo reversivnogo teleobjektiva na osnove algebraicheskogo metoda rascheta opticheskich system [Modeling two-component lens reverse telephoto lens on the basis of the algebraic method for calculation of optical systems]. Science and education: Scientific publication. – 2016, Nº 8, p. 89 – 103.

11. Salnikov A.V. Analiz problem formorovaniya komputernoi elementnoi bazi kompozitcii opticheskih sistem [Analysis of problems of formation of computer element base of composition of optical systems] Thesis of candidate of technical sciences. Saint-Petersburg. 2008. 98 p. URL: http://www.dissercat.com/content/analizproblem-formirovaniya-kompyuternoi-elementnoi-bazykompozitsii-opticheskikh-sistem#ixzz5lb8Ah1An /(date of circulation 11.06.2018).

12. *Fridman M.P.* Svetosilnyi shirokougolnyi objektiv [Light-fast, wide-angle lens]. The patent of the Russian Federation № 2123712. Date of publication 20.12.1998. URL: www1.fips.ru/ (date of circulation 12.06.2018).



#### СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ЦЕЛИ ПО НЕСКОЛЬКИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ КАНАЛАМ

#### АНИКЬЕВ А.А., КАЛИНИН А.В..

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

E-mail: aaanikyev@mail.ru

**Аннотация:** Рассмотрен статистический критерий принятия решения при обнаружении и распознавании цели пассивной оптико-электронной системой по двум спектральным каналам. Показано, что выбранный критерий качества распознавания обеспечивает снижение порога отношения «сигнал/шум», что приводит к выигрышу по дальности до цели.

**Ключевые слова:** байесовский критерий, инфракрасное излучение, спектральный канал, распознавание цели, оптико-электронная система.

#### STATISTICAL ASPECTS OF DECISION-MAKING IN THE RECOGNITION OF GOALS BY SEVERAL SPECTRAL CHANNELS

#### A.A. ANIKIEV, A.V. KALININ.

#### PJSC «Krasnogorsky plant named by S.A. Zverev», Krasnogorsk

E-mail: aaanikyev@mail.ru

**Abstract:** A statistical criterion for decision-making is considered when detecting and recognizing of a target produced by a passive optoelectronic system using two spectral channels. It is shown that the selected criterion of recognition quality provides a reduction in the threshold of the «signal-to-noise ratio», which leads to a distance gain.

**Keywords:** bayesian criterion, infrared radiation, spectral channel, target recognition, opto-electronic system.

#### ВВЕДЕНИЕ

Задача обнаружения малоразмерных движущихся объектов состоит в выделении и идентификации ряда присущих им признаков в наблюдаемом сигнале. Обычно она сводится к сравнению параметров наблюдаемого сигнала с априорно известными параметрами сигналов от объектов конкретного типа. Первый этап процесса обнаружения состоит в выделении параметров принимаемого сигнала, которые можно классифицировать как признаки объекта. В качестве таких признаков, на анализе функциональных зависимостей которых строится процесс обнаружения, в простейшем случае – при одномерном сигнале, следует принять временные характеристики уровня (временную форму) наблюдаемого сигнала. Такой выбор можно обосновать простотой получения и, соответственно, наличием достаточно полных данных о спектрах сигналов и временных зависимостей уровня сигнала для различных типов объектов в различных спектральных поддиапазонах.

Применительно к пассивным оптико-электронным системам (ОЭС) обнаружения и распознавания этот признак выражается в зависимости уровня ИК излучения цели от времени в нескольких спектральных поддиапазонах (интервалах) [1].

Классическая процедура обнаружения и анализа полезного сигнала строится на сравнении отношения правдоподобия с некоторым пороговым уровнем. Пороговый уровень определяет стратегию обнаружения в соответствии с выбранным статистическим критерием качества. Критерии качества обнаружения могут быть байесовскими и не байесовскими в зависимости от набора средств, используемых для решения задачи. К байесовским относятся следующие четыре критерия:

- критерий минимума среднего риска;
- критерий идеального наблюдателя;
- критерий максимума правдоподобия;
- максимальный критерий качества.

К не байесовским критериям качества можно отнести критерий Неймана – Пирсона, обладающий наибольшей мощностью решения при одинаковой значимости и информационный критерий качества.

Цель настоящей работы - применение байесовского критерия минимума среднего риска к задаче многоальтернативного обнаружения цели по двум спектральным каналам с учетом накопленных данных.

Общая схема оптимальной процедуры обнаружения

Пусть  $x(t) \in X$  - случайный процесс, наблюдаемый на интервале  $t \in [0, T]$ , характеризующий временную зависимость уровня сигнала от объекта в выбранном спектральном поддиапазоне. Этот процесс, в зависимости от перепада уровней принятого от объекта сигнала, крутизны нарастания и спада может принадлежать к одному из (m+1) классов, где m – число возможных типов объектов. В соответствии с числом m введем некоторый параметр Q = 0, 1, ..m (Видимо  $Q_i$  - конкретный параметр, 0,1,2,...,i,...,m – их число, присущий объекту типа *i*). Параметр Q – неизвестный, случайный с заданным априорно распределением:

$$P_i = P\{Q=i\} \tag{1}$$

где  $P_i$  - априорная вероятность обнаружения і-го типа объекта, то есть объекта, характеризующегося параметром  $Q_i$ .

Группа событий, со<u>стоящ</u>их в обнаружении *i*-го типа объекта, *i* = 0,1..*m* - полная, то есть

$$\sum_{i=0}^{m} P_i = 1$$
 (2)

Введем в рассмотрение некоторую решающую функцию  $\delta(x) = dj$ , устанавли-вающую соответствие параметра Q = j, где j = 0, m принятому решению dj.

Составим матрицу потерь вида:  $\|C(i, dj)\|$  с компонентами:

$$C(i, dj) = \begin{cases} 0; i = j \\ 1; i \neq j, i, j = \overline{0, m} \end{cases}$$
(3)

Запишем соотношение для функции риска:

$$r(x,dj) = \sum_{i=0}^{m} C(i,dj) P\{Q = \frac{i}{x}\}$$

устанавливающую соотношение между весом ошибки принятия решения *dj* при наблюдении реализации *x(t)* процесса, соответствующего объекту типа *m<sub>i</sub>* - где *i* ≠ *j*.

При задачах обнаружения различных типов объектов вес ошибки является показателем качества алгоритма, поэтому необходимо провести исследование функции риска с целью определения минимума ее значений. В Байесовской постановке задачи обнаружения минимум функции риска достигается при некотором решении  $d_{\kappa}$  – оптимальном именно по минимуму функции риска.

В качестве решающей функции  $\delta(x)$  примем отношение правдоподобия

$$\Lambda_{j} = \frac{W(\frac{x}{Q} = j)}{W(\frac{x}{Q} = 0)}, \text{ где } j = \overline{0, m}$$
(4)

Максимум отношения правдоподобия достигается при единственном значении  $\delta^*(x) = d_K$ , при этом значение функции риска минимально.

В выражении для  $\Lambda_j$ ; - W(x/Q = j) - условная плотность вероятности реализации наблюдаемого процесса.

Запишем выражение для  $\Lambda$  через априорные вероятности  $P_i$ :

$$\Lambda_i \cdot \frac{P_i}{P_0} = \frac{P(Q = i/\chi)}{P(Q = 0/\chi)} \quad , \tag{5}$$

откуда, с учётом выражения для функции риска, имеем:

$$\Lambda_{j} = \frac{W(\frac{x}{Q} = j)}{W(\frac{x}{Q} = 0)} \stackrel{d_{i}}{>} u_{i}u \ll \frac{P_{0}C(0, di)}{P_{i}C(i, d0)} = h_{i}$$
(6)

где 
$$h_i = \frac{P_0 C(0, d_i)}{P_i C(i, d_0)}$$
 - пороговое значение (7)

Составим вектор эталонных значений классификационных признаков по типам обнаруживаемых объектов.

 $z^{j} = \{z_{1}^{j},...,z_{n}^{j}\}, j = \overline{1,m}$  (j – индекс)

В рассматриваемом классе задач примем  $z = \ln \Lambda$ , что переводит данную задачу в класс Байесовских. В этом случае процедура вычисления минимума функции правдоподобия сводится к схеме m — канального коррелятора, где m — число каналов соответствует числу различных рассматриваемых типов объектов.

$$z_{i} = \ln \Lambda_{i} = \frac{2}{N_{0}} \int_{0}^{T} x(t) S_{i}(t) dt - \frac{P_{i}}{N_{0}}$$
(8)

где *i* = 1*, m* .

Структурная схема одноканальной системы обнаружения имеет вид:





Структурная схема т - канальной системы распознавания (идентификации) в одном спектральном диапазоне S<sub>1</sub>(t),...,S<sub>m</sub>(t) - эталонные реализации, соответствующие различным типам объектов (i=1,2,..., т - число типов объектов)

## СХЕМА ПРОЦЕДУРЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ПО ДВУМ СПЕКТРАЛЬНЫМ КАНАЛАМ

Задачу обнаружения целесообразно вести с использованием уровней сигналов в двух (или более) спектральных диапазонах. В этом случае на входе системы обнаружения имеем смесь

 $y(t) = q_1 x_1(Q_1; t) + q_2 x_2(Q_2; t) + \xi(t); \ 0 \le t \le T ,$  (9)

где  $q_{1,2} = 0,1$  - соответственно отсутствие и наличие сигнала в данном спектральном диапазоне:

 $q_1 \in Q_1;$ , а  $\xi(t)$  - реализация шумового  $q_2 \in Q_2;$  процесса.

Задача обнаружения различных типов объектов (фактически – распознавания типов) сводится к задаче оценивания параметров  $q_1, q_2$  и  $Q_1, Q_2$ .

Отношение правдоподобия будет равно

$$\Lambda\left(\frac{y}{g_{1}}, Q_{1}; g_{2}, Q_{2}\right) = \frac{W\left(\frac{y}{g_{1}}, Q_{1}; g_{2}, Q_{2}\right)}{W\left(\frac{y}{g_{1}} = 0, g_{2} = 0\right)}$$
(10)

Общая структурная схема реализации процесса обнаружения с использованием двух спектральных диапазонов приведена на рисунке 2:

Каждый из каналов является m-канальным коррелятором со своей схемой выбора максимума, а число каналов определяется числом возможных исходов события:

- наличием сигнала в диапазоне  $\Delta \lambda_1$ ; отсутствием сигнала в диапазоне  $\Delta \lambda_2$ ;

- наличием сигнала в диапазоне  $\Delta\lambda_2$ ; отсутствием сигнала в диапазоне  $\Delta\lambda_3$ ;

- наличием сигнала в диапазоне  $\Delta\lambda_{_1}$  и в диапазоне  $\Delta\lambda_{_2}.$ 

Для дву-спектрального распознавания необходимы входные устройства, показанные на схеме (рисунок 3) формирующие процесс у(t) (см. рисунок 2).

Д<sub>1</sub> – приёмное устройство диапазона Δλ<sub>1</sub>

На рисунке 3 также обозначено  $S_1(t), \ldots, S_i(t), \ldots$   $S_m(t)$  – набор эталонных реализаций сигналов, соответствующих ожидаемым объектам.

$$y(t) = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} x_{1}(t) dt - \frac{1}{T} \int_{0}^{T} x_{2}(t) dt$$
, где



Рисунок 2.

Структурная схема реализации процесса распознавания (идентификации) с использованием двух спектральных диапазонов



Рисунок 3. Структурная схема системы распознавания (идентификации) с использованием двух спектральных диапазонов

$$x_1(t) = \phi_1(t) + \xi(t)$$

 $x_{2}(t) = \phi_{2}(t) + \xi(t)$  - реализация наблюдаемого объекта, временные зависимости уровня сигнала в ( $\Delta \lambda_{1}$ ) и ( $\Delta \lambda_{2}$ ).

Для полноценных эталонов нужен банк данных по типовым целям, содержащий корреляционные матрицы демаскирующих признаков:

- временные зависимости силы излучения целей в каждом из спектральных диапазонов;

 угловые размеры целей на требуемых дальностях обнаружения в различных ракурсах;

- параметры характерных траекторий полёта;

- характерное расположение целей относительно линии горизонта.

Для упрощения распознавания видов целей их эталоны необходимо оперативно корректировать, вводя информацию о текущей дальности.

#### ПРОЦЕДУРА ОБНАРУЖЕНИЯ В ДВУХ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛАХ С СЕЛЕКЦИЕЙ ТРАЕКТОРИЙ

Дополним устройство двуспектрального обнаружителя устройством траекторной селекции. Для решения задачи траекторной селекции необходимо разработать квази-детерминированную модель траектории  $R_T(\overline{Q}_T, t)$ , где  $\overline{Q}$  - это вектор неизвестных, неслучайных траекторных параметров  $\overline{Q}_T = (Q_0, ..., Q_V)$ .

 $R_T(\overline{Q}_T,t)$  - определяет одну компоненту траектории  $R_T(\overline{Q}_T,t) = \sum_{k=0}^{\nu} Q_k t^k$ , где в формировании значения этой компоненты участвуют следующие параметры:

- *Q*<sub>0</sub> угловая координата;
- $Q_1$  угловая скорость;
- *Q*<sub>2</sub> ускорение и т. д.

Вообще число параметров (*v*) определяется из манёвренных возможностей цели. В нашем случае целесообразно ограничиться первыми двумя, угловой координатой и угловой скоростью.

Очевидно, что на выходе измерителя (датчика) траекторных параметров будет наблюдаться случайный процесс  $y_T(t) = R_T(\overline{Q}_T, t) + \xi(t)$ , где  $\xi(t)$  - шум с гауссовым распределением, обобщающим ошибки и погрешности при различной статистической обработке.

Запишем корреляционную матрицу ошибок измерения  $K_{\xi} = \|K_{j}\|$ , где  $K_{j}$  - коэффициент взаимной корреляции отсчетов в несовпадающие моменты времени.

Совместная плотность вероятности наблюдений:

 $W(y_1,...,y_n/\overline{Q_T}) = L(\overline{Q_T}) y_i = R(\overline{Q_T},t_i) + \xi_i, i = 1,...,n$  - количество отсчетов.

Необходимо провести вторичную обработку таким образом, чтобы найти оценку  $\hat{Q}$  - обеспечивающую тах функции правдоподобия L.

В соответствии с гауссовым законом о нулевом среднем значением уравнения для совместной плотности вероятности наблюдений.

$$L(\overline{Q}_T) = W(y_1, ..., y_n / \overline{Q}_T) = (2\pi)^{-n/2} \det^{-1/2} \left\| K_g \right\| \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n h_{i,j} [y_i - R_T(\overline{Q}_T, t_i]] \times [y_i - R(\overline{Q}, t_i]] \right\}$$
(11), где  $R_T$  - детерминированная функция неизвестных случайных параметров;

у, - гауссова величина;

*H*<sub>*i*,*i*</sub> - матрица, обратная корреляционной.

Продифференцируем *L*(*Q*<sub>*T*</sub>) по всем параметрам и приравняем к нулю.

$$\frac{\partial L(\overline{Q}_T)}{\partial Q_k} = \emptyset; \ k = 0, \dots, \nu + 1$$

Решением системы и является оценка максимального правдоподобия

$$\hat{Q}_m = (\hat{Q}_{0m}, \dots, \hat{Q}_{vm})$$
 is h  $L(\hat{Q}) = const$ 

Форма записи уравнения для определения значений  $\dot{Q}_{T}$ , обеспечивающих  $\max L$  следующая:

$$\sum_{i,j=1}^{n} h_{j} \left[ y_{i} - R_{T}(\overline{Q}_{T}, t_{i}) \right] \cdot \frac{\partial R(Q, t_{i})}{\partial Q_{k}} = 0$$

Решить это уравнение можно, например, методом наименьших квадратов, в этом случае распределение ошибок предполагается любое.

Блок-схему алгоритма оценки параметров траектории можно представить в следующем виде (рисунок 4):



Структура алгоритма оценки параметров траектории

#### РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ОБНАРУЖЕНИЯ

Используя полученные алгоритмы обнаружения цели, проведем количественную оценку реализуемых вероятностей ложных тревог и правильного обнаружения, при использовании в качестве классифицируемых признаков цели её существенно-энергетический параметр – уровень сигнала в одном и двух спектральных диапазонах.

Пусть на входе порогового устройства (рис.5) присутствует сигнал от цели, имеющей следующую плотность вероятностей распределения амплитуды:

$$P(U_{Ci}) = \frac{1}{\sigma_{Ci}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(U_C - U_{Ci})^2}{2\sigma_{Ci}^2}\right]$$
(12),

где i=1,2 – для первого и второго спектральных диапазонов соответственно.

Пусть также на входе порогового устройства присутствует помеха в виде нормального стационарного случайного процесса с нулевым математическим ожиданием амплитуды сигнала:

$$P(U_{\Pi i}) = \frac{1}{\sigma_{\Pi i} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{U_{\Pi i}^{2}}{2\sigma_{\Pi i}^{2}}\right]$$
(13).



#### Рисунок 5.

#### Схема порогового устройства

В этом случае вероятность ложной тревоги на выходе порогового устройства будет определяться выражением вида [2]:

$$P_{\nu T.T.} = \frac{1}{\sigma_{\Pi i} \sqrt{2\pi}} \int_{U_{\Pi OP_i}}^{\infty} \exp\left[-\frac{U_{\Pi i}^{2}}{2\sigma_{\Pi i}^{2}}\right] dU_{\Pi i}$$

Введя замену переменных  $z = \frac{U_{IIi}}{\sigma_{IIi}}$ , получаем:

$$P_{i,T.T.} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{U_{IIOPi}}{\sigma_{IR}}}^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz$$
(14).

Так как величины  $U_{Ci}$  и  $U_{Ii}$  имеют нормальные распределения, то и величина  $U_{\Sigma i} = U_{Ci} + U_{Ii}$ также имеет нормальное распределение:

$$P(U_{\Sigma i}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_{IIi}^{2} + \sigma_{Ci}^{2})}} \exp\left[-\frac{\left(U_{\Sigma i} - U_{c_{0}i}\right)^{2}}{2(\sigma_{IIi}^{2} + \sigma_{Ci}^{2})}\right]$$

При условии, что  $\mathbf{G}_{\Pi i}$   $\mathbf{G}_{Ci}$ , получаем:  $P(U_{\Sigma i}) = \frac{1}{\sigma_{Ti}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(U_{\Sigma N\overline{i}} - U_{0}\right)^{2}}{2\sigma_{Ti}^{2}}\right]$ . В этом случае выражение для вероятности правильного обнаружения на выходе порогового устройства (с учетом замены переменных  $z = \frac{U_{\Sigma i} - U_{OCi}}{\sigma_{\Pi i}}$ ) имеет вид:

$$P_{i,I.T.} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\underline{U}_{IIOPi} - U_{OCi}}^{\infty} \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz$$
(15).

Тогда, согласно критерию Неймана-Пирсона, требуемое соотношение сигнал/помеха q на выходе порогового устройства должно составлять [2]:

$$q_{i} = \frac{U_{Ci}}{\sigma_{\Pi i}} = L_{P}^{-1} (1 - P_{i,\Pi.T.}) - L_{P}^{-1} (1 - P_{i,\Pi O})$$
(16),

где  $\hat{a} = L_P^{-1}(v)$  – обратная функция Лапласа  $L_P(\hat{a}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^a \exp\left[-\frac{z^2}{2}\right] dz$ Вычислим вероятностные характеристики обнаружения с учетом проведения анализа сигналов

Вычислим вероятностные характеристики обнаружения с учётом проведения анализа сигналов от цели в двух спектральных диапазонах.

Пусть на выходе порогового устройства при рассмотренных моделях сигнала от цели и помехи и соотношении сигнал/помеха  $Q_1$ , спектральном диапазоне  $\Delta\lambda_1$ , сформировано решение о наличии цели с вероятностями ложной тревоги и пра-вильного обнаружения  $P_{1.ЛT}$  и  $P_{1.\Pi O}$  соответственно. Пусть в диапазоне  $\Delta\lambda_2$  также обеспечивается автономное принятие решения с вероятностями  $P_{2.\Pi T}$  и  $P_{2.\Pi O}$ .

Допустим, что коэффициент корреляции между сигналами от цели в диапазонах  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$  равен 1, а помехи не коррелированы. В этом случае структурная схема устройства обнаружения соответствует рисунку. 6.



#### Рисунок 6.

Схема выбора решения с некоррелированными помехами.

Пусть правило выбора решения соответствует логическому «И». На основании теоремы о произведении вероятности для независимых событий [3, 4], вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения на выходе системы определяются выражением:

$$P_{JT}^{BbIX} = P_{1JT}P_{2JT}$$

$$P_{IIO}^{BbIX} = P_{1IIO}P_{2IIO}$$

$$(17)$$

Пусть цель должна быть обнаружена с вероятностями:  $P^{\scriptscriptstyle BbIX}_{\scriptscriptstyle \Pi O}=0.98$  и  $P^{\scriptscriptstyle BbIX}_{\scriptscriptstyle \Pi T}=10^{-4}$  .

В случае применения для обнаружения цели сигнала лишь с одного спектрального диапазона, требуемое отношение сигнал/помеха, согласно (16), составит  $q_i = L_p^{-1}(1-10^{-4}) - L_p^{-1}(1-0.98) = 5.76$ . При использовании сигналов от цели по двум спектральным каналам и при условии, что

$$\begin{split} P_{1,\!\Pi\!T} &= P_{2,\!\Pi\!T} \ , \ P_{1\Pi O} = P_{2\Pi O} \ , \ \text{получаем:} \\ P_{1,\!\Pi\!T} &= P_{2,\!\Pi\!T} = \sqrt{P_{\Pi T}^{BbLX}} = \sqrt{0.0001} = 0.01 \\ P_{1\Pi O} &= P_{2\Pi O} = \sqrt{P_{\Pi O}^{BbLX}} = \sqrt{0.98} = 0.99 \end{split}$$
В итоге отношение сигнал/помеха на входе каждого из каналов может быть снижено с 5.76 до 4.7. Возможный выигрыш по дальности за счет этого может составить 10÷12%.

Пусть выбор решения соответствует правилу «ИЛИ». На основании закона о сложении вероятностей для совместных событий [3], получаем:

$$P_{\Pi T}^{BbIX} = P_{1\Pi T} + P_{2\Pi T} - P_{1\Pi T} P_{2\Pi T}$$

$$P_{\Pi O}^{BbIX} = P_{1\Pi O} + P_{2\Pi O} - P_{1\Pi O} P_{2\Pi O}$$

Или, с учетом того, что

$$P_{JTT}^{BbIX} = P_{1,JTT} + P_{2,JTT} P_{ITO}^{BbIX} = P_{1,TO} + P_{2,TO} - P_{1,TO} P_{2,TO}$$
(18)

В этом случае:

$$P_{1,\Pi T} = P_{2,\Pi T} = \frac{P_{\Pi T}^{BbIX}}{2} = \frac{10^{-4}}{2} = 5 \cdot 10^{-5}$$
$$P_{1\Pi O} = P_{2\Pi O} = 1 - \sqrt{1 - P_{\Pi O}^{BbIX}} = 1 - \sqrt{1 - 0.98} = 0.86$$

При этих значениях требуемое соотношение сигнал/помеха, согласно (16) снижается с 5.76 до 5.06, а выигрыш по дальности составляет 6÷8%.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен один из байесовских статистических критериев качества принятия решения по обнаружению и распознаванию цели. Показано, что применение критерия качества по минимуму среднего риска в оптико-электронной системе пассивного обнаружения цели по двум спектральным каналам позволяет снизить пороговый уровень обнаружения по параметру «отношение сигнал/помехи», что в свою очередь приводит к выигрышу по дальности до цели.

#### Список литературы:

1. *Лазарев Л.П*. Оптико-электронные приборы наведения летательных аппаратов: Учебник для технических вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984.- 480 с.

2. *Лебедько Е.Г.* Математические основы передачи информации. Ч.3, 4: учеб. пособие для вузов.-СПб: СПбГУ ИТМО, 2009.- 120 с.

3. Ширяев А.Н. Вероятность : учебник для вузов : в 2 кн. / Ширяев А. Н. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во Моск. Центра непрерывного математич. образования, 2004.

4. *Крицкий О.Л.* Теория вероятностей и математическая статистика для технических университетов. І. Теория вероятностей: учебное пособие / О.Л. Крицкий, А.А. Михальчук, А.Ю. Трифонов, М.Л. Шинкеев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 212 с.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА НАВЕДЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ОБЪЕКТА НА ВЫСОКОСКОРОСТНУЮ ВОЗДУШНУЮ МИШЕНЬ

#### ИЛЮХИН И.М., БЕЛОКУРОВ Е.А.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: evgen65200@yandex.ru

**Аннотация:** Предложены алгоритм и программа, которые позволяют выполнить анализ влияния начальных параметров атаки воздушной мишени (цели) управляемым объектом (снарядом) на кривизну траектории его наведения и возможный промах. Динамика их сближения в виде пошаговых перемещений демонстрируется на экране дисплея ЭВМ. Программа «Наведение» может быть полезна специалистам систем автоматического управления и студентам приборостроительных вузов как инструмент для проведения виртуальных исследований.

**Ключевые слова:** система управления, метод наведения, управляемый снаряд, оптическая головка самонаведения, радиус кривизны траектории наведения, промах снаряда.

## ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE GUIDED PROJECTILE GUIDANCE PROCESS ON A HIGH-SPEED AIR TARGET

#### I.M. ILYUKHIN, E.A. BELOKUROV

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: evgen65200@yandex.ru

**Abstract:** An algorithm and a program are proposed that allow analyzing the effect of the initial parameters of an attack of an air target by a guided missile on the curvature of the trajectory of its guidance and possible miss of the projectile. The dynamics of their convergence in the form of step-by-step movements is demonstrated on the screen of the computer display. The program «Guidance» can be useful to specialists in automatic control systems and students of instrument-making universities as a tool for conducting virtual research.

**Keywords:** control system, guidance method, guided projectile, optical homing head, radius of curvature of the guidance path, miss of the projectile.

Эффективность применения любого оружия в первую очередь определяется вероятностью поражения им цели с первого выстрела. Почти 100% вероятность попадания обеспечивается только при использовании управляемых снарядов, траектория движения которых корректируется автоматической системой их самонаведения, например, оптической головкой самонаведения (ОГС). Однако даже применение самонаводящихся снарядов не исключает возможности их промаха вследствие:

 неблагоприятных начальных условий запуска снаряда или совершения целью манёвра по скорости, которые приводят к «срыву» его управления из-за возникновения недопустимо больших перегрузок при движении по слишком криволинейной траектории сближения;

 внешних воздействий на снаряд, вызывающих случайные колебания его корпуса вокруг центра масс, что может привести к «потере» цели при её выходе за пределы углового поля ОГС;

 инструментально-методических погрешностей собственно ОГС и системы управления снарядом.

Оптический координатор ОГС во всех типах управляемых снарядов «стабилизируется» в пространстве либо гироскопическим следящим приводом (при этом реализуется метод пропорционального наведения снаряда на цель), либо простейшим флюгерным устройством посредством набегающего воздушного потока (метод погони). Это почти 100% исключает дестабилизирующее влияние случайных колебаний корпуса снаряда на процесс его наведения [1]. Инструментально-методические погрешности ОГС и системы управления снаряда даже в самых неблагоприятных случаях, как правило, не превышают ± 1 метра. Кроме того даже при промахе порядка 15-20 метров снаряд уверенно поражает воздушную цель своими осколками, так как его боевая часть в этом случае срабатывает по сигналу неконтактного оптического взрывателя [2].

Поэтому ниже обсуждаются результаты «исследований» влияния на промах снаряда только его начального положения относительно цели и соотношения их скоростей применительно к 2-м чаще всего используемым методам – погони и пропорционального наведения снаряда с учётом допустимой его системой управления перегрузкой [3]. Для этого был разработан алгоритм и программа «Наведение», которые позволяют рассчитать параметры пошагового перемещения управляемого снаряда (текущие координаты, радиус кривизны, возможный промах) и продемонстрировать на экране дисплея ЭВМ динамику его наведения на высокоскоростную воздушную цель. Блоксхема этой программы (она составлена на алгоритмическом языке программирования Паскаль **PascalABC.NET** и имеет объем памяти порядка 65 кБ) представлена на рис.1.

Работа программы начинается с ввода в ЭВМ исходных данных: скорости снаряда- VC и цели – VZ ( если она совершает манёвр по скорости, то и её ускорение – az > 0), начального удаления цели –  $l_0$  от точки пуска снаряда и её начальный курсовой угол -  $q_0$ , временной интервал -dt пошагового перемещения цели и снаряда, значение допустимой его системой управления перегрузки- p и реализуемый метод - MN наведения снаряда. Это позволяет рассчитать допустимую системой управления снаряда кривизну его траектории

$$r_d = VC^2 / (9.81 \times p),$$
 (1)

и начальные координаты цели относительно точки старта снаряда

$$xz_0 = l_0 \times Cos(q_0)$$
 и  $yz_0 = l_0 \times Sin(q_0)$ 

Затем с учётом пошагового перемещения цели и снаряда ( $dz = Vz \times dt$  и  $dc = Vc \times dt$ ) определяются их текущие координаты –

$$xz_{K} = xz_{0} + (Vz + az \times dt) \times dt, yz_{K} = yz_{0} = Const,$$
  
$$xc_{K} = dc \times Cos(q_{K}) \text{ is } yc_{K} = dc \times Sin(q_{K})$$

угол разворота вектора скорости снаряда

 $i_{K} = \operatorname{arctg}[dz \times \sin(q_{K-1})/(l_{K-1}-dc+dz \times Cos(q_{K-1})]$ 

и радиус кривизны его траектории

$$r_{K} = dc / \sin(q_{K}) = Vc \times l_{K} / [Vz \times Sin(q_{K-1})]$$
(2)

где *l<sub>K</sub>* и *q<sub>K</sub>* -текущие значения дальности снаряд-цель и её курсового угла.



Рисунок 1. Блок схема алгоритма расчёта параметров и демонстрации траектории наведения УРС на перемещающуюся цель

В ходе каждого k – го шага расчёта выполняется сравнение текущей кривизны траектории движения снаряда -  $r_K$  с её допустимым значением -  $r_d$ , а также скорости снаряда и цели, совершающей скоростной манёвр -

 $Vz_K = Vz_{K-1} + az \times dt$ .

Если  $yc \le yz$  и  $r_K < r_d$ , то выдаётся решение «снаряд потерял управление» на k – шаге атаки в точке с координатами  $xc_K$ ,  $yc_K$  и пролетает мимо цели с промахом

$$CZ_{K} = l_{K-1} \times VZ \times Sin(q_{K-1}) / Vc_{(3)}$$

При  $yc \ge yz$  и  $Vz \ge Vc$  принимается решение – «снаряд начинает отставать от цели на k - шаге атаки в точке с координатами  $xz_{K}$  и  $yc_{K}$ , а при Vc > Vz и  $r_{K} > r_{d}$  - «снаряд поражает цель» на k шаге атаки в точке с координатами  $xc \cong xz$  и  $yc \cong yz$ .

Расчёт завершается демонстрацией на экране дисплея ЭВМ динамики процесса сближения снаряда с целью и предложением продолжить исследования при других исходных данных. Конечная картина демонстрации сближения снаряда с целью в случае её уверенного поражения (а) и при возникновении значительного промаха *CZ* > 20 метров (б) представлена на рис. 2.

Проведённые с помощью программы «Наведение» исследования количественно (1,2,3) подтвердили, что:

 радиус кривизны траектории движения атакующего снаряда непрерывно уменьшается (примерно с 10<sup>5</sup> до 10<sup>3</sup> метров) и только «вблизи» цели начинает увеличиваться;

2) наибольшее влияние на кривизну траектории



#### а) снаряд поразил цель



#### б) снаряд потерял управление

#### Рисунок 2. Варианты траектории сближения УРС с целью со стороны её нижней полусферы

снаряда, а, следовательно, и на его возможный промах, оказывает начальный курсовой угол цели -  $q_0$ ; его влияние особенно существенно, когда  $1 \le q_0 \le 2.5$  радиан;

 с ростом начальной дальности до цели (*l*<sub>0</sub> ≥ 3 километра) траектория движения снаряда «спрямляется», что особенно эффективно при её атаке на встречном курсе; 4) увеличение относительной скорости снаряд-цель приводит как к росту начального радиуса кривизны его траектории, так и допустимого его значения, а поэтому можно считать оптимальным, когда  $2.5 \ge Vc / Vz \ge 1.5$ ;

5) использование целью манёвра по скорости (*az* > 0) заметно увеличивает как кривизну траектории наведения снаряда, так и продолжительность атаки, что с учётом технических ограничений по дальности управляемого полёта снаряда может привести к его «скоростному» промаху;

6) метод пропорционального наведения при равных начальных условиях обеспечивает менее криволинейную траекторию сближения снаряда с целью нежели метод погони поскольку система управления направляет вектор его скорости в текущую упреждённую точку, куда цель переместится лишь после следующего шага своего полёта;

7) «точность» расчёта координат точки «сры-

ва» снаряда с траектории его управляемого наведения ( $r_K \cong r_d$ ) определяется только временным интервалом dt пошагового перемещения цели и снаряда; в большинстве случаев достаточно, если  $0.25 \le dt \le 0.5$  секунды.

Программа «Наведение» может быть полезна специалистам систем автоматического управления и студентам приборостроительных вузов в качестве инструмента для проведения исследований по оценке влияния начальных условий атаки цели на возможный промах самонаводящегося на неё снаряда.

#### Список литературы:

[1] *Криксунов Л.З.* Следящие системы с оптикоэлектронными координаторами. — Киев, Техника, 1991, 156 с.

[2] Лазарев Л.П. Оптико-электронные приборы наведения. — М.: Машиностроение, 1989, 512 с.

[3] *Криницкий Е.И.* Системы самонаведения. — М.: Машиностроение, 1971. — 235 с.

### УДК 681.2.084



## ИНКЛИНОМЕТР НА БАЗЕ ТРЕХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

#### АЛЕКСЕЙЧЕНКО А.А., ВЕРЕНИКИНА Н.М., ПОНОМАРЕВ А.П.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: alekseychenko@electrooptika.ru, nmvbmstu@mail.ru, ponomarev.and.p@yandex.ru

**Аннотация:** Разработана конструкция лазерного гироскопа с малыми погрешностями, а также общая конструкция инклинометра, удовлетворяющая требованиям, предъявляемым к скважинному оборудованию. Благодаря использованию малогабаритных лазерных гироскопов показана возможность снизить общие габариты прибора и создать высокоточный прибор для проведения геологических исследований.

Ключевые слова: малогабаритный лазерный гироскоп, лазерный гироинклинометр, высокоточный инклинометр.

## **INCLINOMETER BASED ON THREE LASER GYROSCOPES**

#### ALEKSEYCHENKO A.A., VERENIKINA N.M., PONOMAREV A.P.

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: alekseychenko@electrooptika.ru, nmvbmstu@mail.ru, ponomarev.and.p@yandex.ru

**Abstract:** The work is devoted to development of an inclinometer built on the basis of block uniaxial laser gyroscopes, which has high precision and small dimensions. Due to using compact laser gyros have an opportunity to reduce overall dimensions of the device, this makes it possible to create a high-precision instrument for conducting geological researches.

**Keywords:** : small-sized laser gyroscope, laser gyroinclinometer, small-sized borehole tool, high-precision inclinometer.

#### введение

Стремительные темпы развития нефтегазовой промышленности, повышение интенсивности разработки существующих и освоение новых месторождений ископаемых требуют увеличения точности и надежности контроля положения скважин в пространстве. Для решения этих задач создаются инклинометрические приборы, они позволяют обеспечить необходимую точность и определить геофизическое положение скважины [1,2].

Лидирующее положение на рынке инклинометрических приборов занимают устройства, построенные на основе МЭМС-технологий в виду их малых габаритов [2]. Однако потенциал их точности весьма невелик, в связи с этим производители заинтересованы во внедрении новых решений и освоении новых областей техники. Одним из таких решений является использование лазерного гироскопа в качестве основного источника информации о профиле скважины.

Лазерный гироскоп обладает довольно внушительными размерами, чем и обеспечивается его высокая точность, однако в работе предлагаются методы, позволяющие существенно снизить габариты устройства с некритичным понижением конечной точности. Предлагаемая конструкция инклинометра на базе разработанного лазерного гироскопа позволяет обеспечить жесткие габаритные ограничения на скваженные приборы и расширить диапазон рабочих температур, а также поддерживать и непрерывный и многоточечный режимы работы.

Использование в качестве чувствительного датчика лазерных гироскопов, наряду с применением блока акселерометров, позволяет добиться многофункциональности и высоких параметров точности инклинометрического устройства.

#### ГИРОИНКЛИНОМЕТР НА БАЗЕ ТРЕХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПОВ

Основной проблемой при разработке инклинометрического прибора на основе лазерных гироскопов являются конечные габариты устройства, связанные в первую очередь с размерами скважинного оборудования. Для решения этих задач был спроектирован трехосный гироскопический инклинометр, в котором основным чувствительным элементом выступает малогабаритный лазерный гироскоп.

Для этого был разработан лазерный гироскоп, представленный на рис.1. Использование зеркального резонатора обосновано, в первую очередь, малыми габаритами, а во-вторых, повышенной устойчивостью к внешним воздействиям [3].



Рисунок 1. Малогабаритный лазерный гироскоп

Для эффективного снижения габаритов устройства без критических потерь в точности были разработаны такие подсистемы лазерного гироскопа, как механическая виброподставка и система регулирования периметра [4].

Система регулирования периметра разработана для стабилизации частоты генерации и выполнена в виде двух пьезокорректоров (рис. 2), расположенных по одной стороне лазерного гироскопа. Такое расположение выгодно по нескольким причинам. Система вырабатывает два разнополярных сигнала и подает на каждый пьезокорректор. Таким образом, зеркала, установленные на эти пьезокорректоры, будут перемещаться в разных направлениях, при этом периметр сохраняется неизменным, однако длины сторон резонатора, а, следовательно, расстояния между центрами рассеяния зеркал изменяются и, очевидно, изменяются параметры рассеянных волн, что позволяет минимизировать зону захвата – основную



Рисунок 2. Конструкция пьезокорректора



Рисунок 3. Конструкция виброподвеса

погрешность лазерного гироскопа [5, 6]. Одновременно с этим система стабилизации периметра осуществляет подстройку частоты генерации.

Также был произведен анализ и моделирование работы системы регулирования, что позволило выявить наиболее оптимальные параметры пьезоприводов [7, 8].

В лазерном гироскопе предполагается использовать центральный виброподвес, который реализует знакопеременное начальное смещение, чем обеспечивает вывод рабочей точки из зоны захвата встречных волн и уменьшение эффективного значения зоны захвата. На текущий момент существует два эффективных способа реализации этого смещения: с помощью невзаимных элементов (ячейка Фарадея и др.) или с помощью механических колебаний [6].

Второй способ заключается в реализации механических крутильных колебаний кольцевого лазера. В этом случае лазер устанавливают на специальную конструкцию, представленную на рис. 3, которая будет совершать вынужденные колебания (с помощью магнита или пьезопреобразователя) на собственной резонансной частоте. Главные преимущества механической знакопеременной подставки (виброподставки) – отсутствие невзаимных элементов в резонаторе и, что важно, исключение эффекта «накапливания» подставки, поскольку «средняя» точка механических колебаний лазера не смещается относительно основания прибора. Изъяном данного способа является нежесткость крепления лазера, большие габариты и, очевидно, повышенная чувствительность к ударам [5, 6].

В ходе разработки конструкции инклинометра при проведении анализа существующих решений [4] для малогабаритных систем были выявлены наиболее надежные и простые решения, однако большинство из них не позволяет реализовать требуемые габаритные параметры инклинометра. В связи с этим, под конкретные задачи была разработана конструкция, представленная на рис. 4, в виде тубуса с взаимным расположением лазерных гироскопов под 90° друг к другу, где учтена возможность удобной установки и монтажа дополнительных датчиков и электронных устройств.

Стоит отметить, что система, спроектированная в ходе данной работы, полностью удовлетворяет требованиям к точности и размерам, предъявляемым к скважинным приборам. Также конструкция прибора предусматривает установку трехосного блока акселерометров; информация, получаемая об ускорениях прибора, используется в расчетах зенитного и апсидального угла. В состав прибора также входят термодатчики и микропроцессорный модуль, необходимый для цифровой обработки данных.

Диаметр разработанного устройства составляет 105 мм, что позволяет применять его для исследований скважин большого диаметра, однако предусмотрены возможные варианты построения малогабаритных лазерных гироскопов, которые могут обеспечить диаметр устройства не более 55 мм.

Разработанный инклинометр может быть доработан и модифицирован с целью снижения его габаритов при некритичных потерях в точности, в частности, путем использования невзаимных элементов для вывода рабочей точки из зоны захвата встречных волн вместо механического виброподвеса. Однако в таком случае прибор станет крайне чувствительным к воздействию магнитных полей. В связи с этим модификацированный прибор следует использовать в районах с отсутствием магнитных аномалий, либо применять системы для



Рисунок 4. Конструкция прибора

устранения влияния внешнего воздействия, либо включить в конструкцию прибора систему магнетометров. Совместное использование двух систем (лазерных гироскопов и магнетронов) позволяет решать сразу несколько дополнительных задач при проведении геофизических исследований [1]:

 определение азимута, зенитного и апсидального углов при исследовании скважин;

 исследование параметров и свойств магнитных аномалий;

 учет воздействия магнитных возмущений на точность из-за залегания магнитовоспримчивых материалов в пластах породы;

 исследование профиля скважины путем определения магнитного азимута.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена разработка инклинометра, полностью удовлетворяющая точностным и габаритным требованиям для скважинного оборудования.

Рассмотрены возможности получения комплексного устройства для геофизических исследований, а также дальнейшего уменьшения габаритов трехосного блока лазерных гироскопов.

#### Список литературы:

1. Барышников, К.О., Коптенков, М.И., Баландин А.И. Скважинный прибор инклинометра // Лесной вестник. 2015. №3. С. 50–56.

2. Биндер, Я.И. Актуальные вопросы построения и использования непрерывных гироинклинометров

// 75 лет кафедре информационно-навигационных систем. СПб.: СПб.НИУ ИТМО, 2012. С. 201–209.

3. Болотнов, С.А. Лазерные информационно-измерительные системы: учеб. Пособие: в 3-х ч. / С.А. Болотнов, Н.М. Вереникина, А.А. Алексейченко; под ред. О.В. Рожкова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005. – Ч. 3. – 94 с.

4. *Кузнецов Г.М.* Конструктивные решения малогабаритных лазерных гироскопов / Г.М. Кузнецов // 75 лет кафедре информационно-навигационных систем. СПб.: СПб.НИУ ИТМО, 2012. С. 160–166.

5. *Бычков, С. И*. Лазерный гироскоп / С.И. Бычков, Д. П. Лукьянов, А.И. Бакаляр / под ред. С. И. Бычкова. М.: Сов. Радио, 1975. 424 с.

 Болотнов, С.А. Лазерные информационно-измерительные системы: учеб. Пособие: в 3-х ч. / С.А. Болотнов, Н.М. Вереникина; под ред. О.В. Рожкова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2005. – Ч. 2. – 92 с.

7. Запотылько Н.Р., Недзвецкая А.А. Пьезокорректоры наноперемещений для прецизионного управления периметром лазерного гироскопа [Электронный ресурс] / Труды Х межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» 24-25 ноября 2009 г. – Режим доступа: http:// nuclphys.sinp.msu.ru/ school/s09/09\_11.pdf.

8. Виноградов, А.Н., Вотинов, Ю.Ю., Матвеев Е.В. Термоупругие модели многослойного пьезопривода наноперемещений в лазерном гироскопе / Концентрированные потоки энергии в индустрии наносистем, материалов и живых систем. Труды 2 Всероссийской научной школы для молодежи, - М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2009. с. 109–119.

#### **References:**

1. Baryshnikov, K.O., Koptenkov, M.I., Balandin, A.I. The device for the well to the inclinometers // Lesnoy vestnik. 2015. №3. P. 50–56.

2. *Binder, Y.I.* Actual questions of construction and use of continuous gyroinclinometers // 75 years of the Department of information and navigation systems. St. Petersburg: SPb.NIU ITMO, 2012. P. 201-209.

 Bolotnov, S.A. Laser Information and Measuring Systems: Textbook. Allowance: in 3 parts / SA. Bolotnov, N.M. Verenikina, A.A. Alekseychenko; Ed. O.V. Rozhkov.
 Moscow: BMSTU, 2005. - Part 3. - 94 pp.

4. *Kuznetsov, G.M.* Constructive solutions of smallsized laser gyroscopes. Kuznetsov // 75 years old department of information and navigation systems. St. Petersburg: SPb.NIU ITMO, 2012. p. 160-166.

5. *Bychkov, S. I.* The Laser Gyroscope. Bychkov, D. P. Lukyanov, A.I. Bakalar / ed. S.I. Bychkov. Moscow: Sov. Radio, 1975. 424 pp.

6. *Bolotnov, S.A.* Laser Information and Measuring Systems: Textbook. Allowance: in 3 hours / SA. Bolotnov, N.M. Verenikin; Ed. O.V. Rozhkov. - Moscow: MSTU them. Bauman, 2005. - Part 2. - 92 pp.

7. Zapotylko N.R., Nedzvetskaya A.A. Piezocorrectors of nanodisplays for precise control of the perimeter of a laser gyroscope [Electronic resource] / Proceedings of the Xth interuniversity scientific school of young specialists "Concentrated energy flows in space technology, electronics, ecology and medicine" November 24-25, 2009 - Access mode: http: // nuclphys .sinp.msu.ru / school / s09 / 09\_11.pdf.

8. Vinogradov, AN, Votinov, Yu.Yu., Matveev E.V. Thermoelastic models of a multilayer piezoelectric drive of nanodisplays in a laser gyroscope / Concentrated energy flows in the industry of nanosystems, materials and living systems. Proceedings of the 2nd All-Russian Scientific School for Youth, Moscow: Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, 2009. p. 109-119.

# СИНТЕЗ ПАНОРАМНОГО ОБЪЕКТИВА ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

#### ОТКУПМАН Д.Г., ТИМАШОВА Л.Н.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: odvk@ya.ru, rl2@bmstu.ru

Аннотация: Рассматривается синтез сверхширокоугольного (особоширокоугольного) объектива типа «Рыбий глаз», обеспечивающего панорамное полусферическое поле зрения в средневолновой ИК области спектра. Методика представленного синтеза основывается на создании базового объектива и афокальной насадки, с их последующим объединением и оптимизационным доведением оптической системы до требуемых параметров. Полученный таким образом объектив удовлетворяет высоким требованиям качества изображения и может быть использован в панорамных «смотрящих» тепло-пеленгационных системах с охлаждаемыми приёмниками излучения.

Ключевые слова: синтез, инфракрасная оптика, сверхширокоугольный объектив, «Рыбий глаз», тепловизор.

## SYNTHESIS OF PANORAMIC LENS FOR THE INFRARED CAMERAS OF THE MID-WAVELENGTH

#### OTKUPMAN D.G, TIMASHOVA L.N.

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: odvk@ya.ru, rl2@bmstu.ru

**Abstract:** The synthesis of an ultra-wide-angle (especially wide-angle) objective of the «Fish-eye» type, providing a panoramic hemispherical field of view in the mid-wave IR (MWIR) region of the spectrum is considered. The technique of the presented synthesis is based on the creation of a basic lens and an afocal nozzle, with their subsequent integration and bringing the optical system to the required parameters. The received lens meets high quality requirements and can be used in panoramic of forward-looking infrared (FLIR) cameras with cooled matrix.

Keywords: synthesis, infrared optics, ultra-wide-angle lens, «Fish-eye», thermal imager.

#### ВВЕДЕНИЕ

При использовании оптико-электронной обзорно-наблюдательной аппаратуры, часто обнаружение источников возможных угроз (целей) необходимо проводить в широких угловых полях, ввиду того, что объект во многих случаях может появиться из любого направления, за короткое время и в тёмное время суток. В связи с этими и другими факторами всё большее внимание разработчиков привлекают панорамные инфракрасные оптические системы [1]. Решение этих задач без использования оптико-механического сканирования может быть обеспечено за счёт широкоугольной оптики.

Наиболее сложным типом современных инфракрасных систем являются охлаждаемые тепловизионные камеры, называемые также системами 3-го поколения, обладающими наилучшими возможностями по критериям эффективности различения объектов по их температурному контрасту на окружающем фоне. [2]

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ СИНТЕЗА

Помимо обеспечения сверхвысоких угловых полей порядка 180°, при которых довольно сложно обеспечить высокое качество изображения, трудности при создании подобного типа оптических систем также обуславливаются рядом жёстких требований, таких как:

- ограниченная номенклатура используемых материалов, прозрачных для ИК области спектра;

- ахроматизация системы в широком спектральном диапазоне; - затруднения в использовании склеенных/ контактных компонентов;

- минимальная толщина линз для увеличения светопропускания оптической системы;

- первая поверхность оптической системы должна быть выпуклой к пространству предметов для захвата панорамной картины;

 высокие значения относительных отверстий для обеспечения приемлемых энергетических параметров;

- обеспечение минимизации влияния эффекта Нарцисса [3].

Выбор средневолнового спектрального диапазона 3÷5 мкм обусловлен рядом преимуществ по сравнению с длинноволновым 8÷14 мкм [4].

В работе были использованы только легкодоступные материалы: монокристаллы кремния (Si) и германия (Ge), образующие удачную пару для исправления вторичного спектра [5].

В качестве приёмника излучения выбран типовой фотоприёмный фокально-плоскостной модуль на основе охлаждаемой матрицы фотодиодов из антимонида индия (*InSb*), параметры которого представлены в табл.1.

Оптическая система представляется в виде двух частей – афокальной насадки и базового объектива. Афокальная насадка преобразует высокие значения входного углового поля в умеренные фокусирующего базового объектива [6] (обратный телеобъектив).

Синтез оптической системы в данной работе проводится с использованием пакета прикладных программ автоматизированного расчёта оптических систем «Zemax» [7].

Наименование	Обозначение	Значение		
Диапазон спектральной чувствительности, <i>мкм</i>	$\Delta\lambda$	3,6-4,9		
Формат матрицы, элементов	M  imes N	640 × 512		
Шаг элементов матрицы, мкм	$a_{\mathfrak{s}} = b_{\mathfrak{s}}$	15		
Эквивалентная шуму разность температур, мК	$\Delta T_n$	≤25		
Плоский угол поля зрения центрального элемента, $^\circ$	${\cal O}'_{A'}$	≥14		
Высота охлаждаемой диафрагмы, мм	<i>z'</i> од	24		
Диаметр охлаждаемой диафрагмы, <i>мм</i>	h <sub>ОД</sub>	6; 8; 12		

Таблица 1. Технические характеристики матричного фотоприёмного модуля

#### ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЁТ

Размеры матрицы по длинной  $a_i$  и короткой  $b_i$  стороне, в предположении бесконечно малого расстояния между элементами:

 $a_{_{\!M}} \times b_{_{\!M}} = M \cdot a_{_{\!9}} \times N \cdot b_{_{\!9}} = 9,596 \text{ мм} \times 7,676 \text{ мм}$ . Оптическая частота (Найквиста):

$$v_{\text{max}} = \frac{1}{2 \cdot a_2} \approx 33 \text{ JMH/MM}$$

Заднее фокусное расстояние афокальной насадки для диагонального исполнения объектива (по короткой стороне матрицы):

$$f'_{AH} = \frac{b_{M}}{2\omega_{_{3\kappa\theta.}}} \approx 3 \text{ MM}$$

где  $2\omega_{_{_{ЭК6.}}} = 180^\circ = \pi$  – входное угловое поле всей системы.

Угловое поле базового объектива  $\omega_{_{BO}}$  рекомендуется задавать порядка 1/6 от входного углового поля. Тогда видимое увеличение афокальной насадки:

$$\Gamma = \frac{\omega_{_{3KB.}}}{\omega_{50}} = 6^{\times}$$

Фокусное расстояние базового объектива:

$$f'_{EO} = \frac{b_{M}}{2 \cdot \tan(\omega_{EO})} \approx 14 \text{ MM}$$

Апертура исходной оптической системы:

$$A \ge 2\lambda_{\max} \cdot v_{\max}$$

где  $\lambda_{\text{max}}$  – максимальная длина волны излучения.

Для данного типа матричных приёмников величина относительного отверстия также ограничена параметрами охлаждаемой диафрагмы и, соответственно, апертурным углом:

$$A = \frac{h_{O\mathcal{A}}}{z'_{O\mathcal{A}}}; \ \sin \sigma'_{A'} = \sin \left( \arctan \frac{h_{O\mathcal{A}}}{2 \cdot z'_{O\mathcal{A}}} \right).$$

С целью получения высокого относительного отверстия A = 1:2, значение диаметра охлаждаемой диафрагмы выбрано  $h_{OII} = 12 \text{ мм}$ .

#### СИНТЕЗ АФОКАЛЬНОЙ НАСАДКИ

Афокальная насадка (рис. 1), или телескопический конвертор, конструктивно является телескопической системой Галилея.

Исходя из заданного большого углового поля, синтез проводится для сферической поверх-

ности пространства объектов, и геометрические искажения изображения оцениваются по F-0 дисторсии.

Воспользовавшись одной из специальных функций «Solves», доступной в «Zemax», можно задавать радиусы кривизны сферических поверхностей через подобранные, с учётом умеренной минимизации габаритов, оптические силы ф, исходя из соотношений:

$$\Gamma = \frac{f'_{i}}{f'_{i+1}}; \ \varphi_{i} = \frac{1}{f'_{i}}; \ \varphi_{i+1} = \frac{1}{f'_{i+1}},$$

где і – порядковый номер элемента.

Расстояние между линзами определяется как разность фокусных расстояний. Апертурная диафрагма располагается за афокальной насадкой. Базовый объектив заменяется эквивалентным параксиальным.

Важной особенностью этого синтеза является учёт того, что численные методы, заложенные в программе для оптимизации систем, не справятся с задачей обеспечения таких высоких угловых полей сразу, поэтому процесс получения заданного углового поля – это итерационный процесс с постепенным повышением углового поля на несколько градусов и оптимизацией при каждом новом значении. Это утверждение может относиться и к другим оптимизируемым параметрам системы.

Основными операндами целевой оптимизации будут являться: фокусное расстояние, хроматические аберрации, F-θ дисторсия. Базовая целевая функция при начальной оптимизации – СКЗ диаграммы пятна рассеяния, на заключительных этапах – СКЗ волнового фронта. В качестве переменных параметров принимаются все радиусы кривизны и ограниченно воздушные промежутки.

Первым компонентом насадки является отрицательный компонент, вторым – положительный. При этом входной зрачок будет мнимым, за счет чего и достигается большое угловое поле. Рекомендуется, для уменьшения аберраций, разделять отрицательную линзу на две и более, когда видимое увеличение системы Г>2<sup>×</sup>. Однако в данной системе, с целью уменьшения количества элементов и с учётом высоких значений показателей преломления, Афокальная насадка



Рисунок 1. Оптическая система афокальной насадки



Рисунок 2. Волновые аберрации афокальной насадки

этого сделано не было. При этом, изменяя положение апертурной диафрагмы на заключительном этапе синтеза, этот дополнительный компонент можно позаимствовать у базового объектива скомпенсировав, таким образом, аберрации.

Волновые аберрации (рис. 2) полученной системы не превышают значения ±0,35λ.

#### СИНТЕЗ БАЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

Базовый формирующий объектив, представленный на рис. 3, синтезировался на основе двухлинзового расклеенного объектива в малых угловых полях, к нему присоединялся положительный мениск и при постепенном увеличении углового поля до заданного значения, получаются требуемые параметры.



Рисунок 3. Оптическая система базового объектива



Рисунок 4. Волновые аберрации базового объектива

Так, волновые аберрации базового объектива не превышают ±1/4λ (рис. 4).

В качестве начальных данных для синтеза этого узла также можно воспользоваться композиционными методами [8], частично доступных из «Zemax» в функциях «Solves», или готовой моделью, с последующим пересчётом и/или оптимизацией на заданное фокусное расстояние.

#### ЗАВЕРШИТЕЛЬНЫЙ СИНТЕЗ

На заключительном этапе синтеза к афокальной насадке вместо параксиального, присоединяется реальный базовый объектив. Система совместно оптимизируется до получения необходимых параметров. Выдерживаются заданные расстояния от последней поверхности до плоскости чувствительных элементов (с учётом расположения между ними отрезающего светофильтра), размеров приёмника излучения (ПИ) и охлаждаемой диафрагмы (ОД), совмещённой с апертурной диафрагмой (АД) оптической системы.

Итоговая система объектива с 2ω=180°, *f*'=3,25 мм, A=1:2, изображена на рис. 5 с указанием материалов отдельных блоков линз.



Оптическая схема



Рисунок 6. Кривизна поля, астигматизм и дисторсия



Рисунок 7. Диаграмма пятна рассеяния



Рисунок 8. Поперечные аберрации



Рисунок 9. Волновые аберрации



Функция концентрации энергии в пикселе размером 15×15 мкм



Рисунок 11. Модуляционная передаточная функция на частоте матрицы



Рисунок 12. Зависимость пропускания от длины волны

Как видно из графиков анализа, максимальные значения продольной кривизны поля и астигматических отрезков порядка 25 мкм, F-0 дисторсия не превышает 25% (рис. 6). Наблюдается незначительная сферическая аберрация и от центра к краю поля плавное увеличение комы (рис. 7). Геометрические аберрации (рис. 8) не превышают значения в 50 мкм, волновые (рис. 9) – 0,35λ. Функция концентрации энергии излучения в пикселе на уровне не менее 0,7 (рис. 10). Модуляционная передаточная функция (частотно-контрастная характеристика) на частоте матрицы не ниже уровня 0,55. Таким образом, полученный объектив обладает качеством изображения близким к дифракционному пределу. Пропускание всей системы (рис. 12), в предположении нанесения просветляющих покрытий с коэффициентом 0,98, на уровне порядка 0,8.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанная методика показывает один из возможных способов синтеза широкоугольных ИК объективов, используемых в современных тепловизионных камерах.

Очевидно, качество системы будет повышаться при сужении углового поля, а добавление дополнительных линз, несферических поверхностей, использование специальных материалов и увеличение габаритов улучшит качество оптической системы в ущерб технологичности.

Основным недостатками такой системы будут являться: неустранимая отрицательная дисторсия, которую можно корректировать при цифровой пост-обработке с потерями в разрешении на краях; малая угловая разрешающая способность, ограничивающая дальность действия системы; жёсткие допуски на изготовление, сборку и юстировку.

Полученную короткофокусную сверхширокопольную оптическую систему, предназначенную в основном для работы в режиме обнаружения, целесообразно использовать в паре с длиннофокусной узкопольной оптической системой, позволяющей работать в режиме распознавания/идентификации цели.

#### Список литературы:

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники – М.: МИИГАиК, 2011. – 84с.

2. Колючкин В.Я., Мосягин Г.М. Тепловизионные приборы и системы – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 57 с.: ил.

3. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г*. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с. +8 с. цв. вкл.

4. Волков В.Г., Moucees E.A., Митрофанова Ю.С., Сеник Б.Н. Современные тенденции в разработках инновационных тепловизионных объективов и проблемные вопросы их промышленного производства. Фотоника №1/69/2018, стр. 94-105.

5. *Грамматин А.П*. Методы синтеза оптических систем – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. – 65 с.

Патент РФ №2347251, МПК G02B 13/06, G02B 9/60, Объектив «Рыбий глаз» для видеокамеры / Колючкин В.Я., Тимашова Л.Н., Колобов К.В., Князев А.А.; заявитель и патентообладатель ООО «Лаборатория трёхмерного зрения».

6. Zemax, LLC - https://www.zemax.com/.

7. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. – Изд. 2-е. – М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2010. – 382 с.: ил., табл.



## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПА НЕФТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ МЕТОДОМ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

#### БЕЛОВ М.Л., ВСЯКОВА Ю.И., ГОРОДНИЧЕВ В.А., НАЗАРОВ В.В., МИХАЙЛОВСКАЯ М.Б.

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

E-mail: belov@bmstu.ru, gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru

**Аннотация:** Проведено математическое моделирование для оценки влияния типа нефти на коэф-фициент отражения трехслойной системы «воздух-нефть-вода» и характеристики обнаруже-ния лазерным методом нефтяных загрязнений на водной поверхности на длине волны излу-чения 0,355 мкм. Показано, что зависимости коэффициента отражения «воздух-пленка нефти-вода» от толщины пленки нефтепродукта могут сильно отличаются для разных типов нефти. Однако, вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог для разных типов нефти отличаются незначительно. Таким образом, для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности лазерным методом на безопасной для зрения длине волны излучения 0,355 мкм может быть использован один пороговый алгоритм обна-ружения для всех типов нефтепродуктов.

Ключевые слова: лазер, нефтяные загрязнения, дистанционный метод, обнаружение.

## INFLUENCE ANALYSIS OF OIL BASE ON DETECTION CHARACTERISTIC BY LASER METHOD OF OIL POLLUTION ON WATER SURFACE

#### BELOV M.L., VSYAKOVA YU.I., GORODNICHEV V.A., NAZAROV V.V., MIKHAYLOVSKAYA M.B.

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

E-mail: belov@bmstu.ru, gorod@bmstu.ru, ekomonit@bmstu.ru

**Abstract:** Mathematical simulation is made for impact assessment of oil base on reflection coefficient of three-layer system «air-oil-water» and detection probability by laser method of oil pollution on water surface for wavelengths  $0,355 \mu$ m. It is shown that dependence reflection coefficient of three-layer system «air-oil-water» on oil film thickness can be very much vary for different oil bases. However, correct detection probabilities and false alarm probabilities vary little for different oil bases. Thus for detection problem of oil pollution on water surface by laser method for eye-safe wavelengths  $0,355 \mu$ m can be used single threshold detection algorithm for all oil bases.

Keywords: laser, oil pollution, remote sensing method, detection.

#### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из актуальных экологических задач является контроль нефтяных загрязнений морских, озерных и речных акваторий (см., например, [1-4]).

Среди методов дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности наиболее эффективными являются лазерные методы, основанные на регистрации отраженного от водной поверхности лазерного излучения или на регистрации лазерно-индуцированного флуоресцентного излучения водной поверхности (см., например, [5-13]).

Лазерные методы зондирования могут использоваться в широком диапазоне атмосферных условий независимо от времени суток и не требуют естественного освещения.

Методы, основанные на регистрации отраженного от водной поверхности лазерного излучения, имеют более простую аппаратурную реализацию и позволяют проводить обнаружение нефтяных загрязнений при большой высоте авиационного носителя и широкой полосе сканирования на водной поверхности.

Данная статья посвящена разработке лазерного метода обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности, основанного на регистрации отраженного от водной поверхности излучения и использующего безопасную для зрения лазерную длину волны излучения.

#### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Энергетический расчет лазерного локатора и расчет вероятностей правильного обнаружения и ложных тревог для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на морской поверхности обычно проводится для средних характеристик нефти (см., например, [6,7,14]). Однако, разные типы нефти имеют существенно различные оптические характеристики.

На рис. 1 - 4 для примера приведены оптические характеристики различных нефтей для разных длин волн.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости показателя преломления *n* и поглощения *k* шести типов нефти для четырех длин волн излучения ультрафиолетового и видимого спектрального диапазона [15]. По вертикальной оси на рис. 1



Показатель поглощения к шести типов нефти для четырех длин волн излучения



Показатель преломления п нефти Канидабамского месторождения для четырех длин волн излучения





приведены значения показателей преломления нефтей, а на рис. 2 - значения показателей поглощения нефтей. По горизонтальной оси на рисунках приведены типы нефтей 1 - 6, соответствующие различным месторождениям [15] (1 – нефть 640 по классификации [15]; 2 - 4; 3 - 1; 4 - 20; 5 – 5; 6 - 192). Разные кривые на рисунке соответствуют разным длинам волн: 1 – длина волны 0,3 мкм; 2 – 0,4 мкм; 3 – 0,5 мкм; 4 – 0,6 мкм.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости показателя преломления n и поглощения k нефти Канидабамского месторождения для четырех длин волн излучения видимого и ближнего инфракрасного спектрального диапазона [16].

Из рисунков видно, что поглощение нефтей возрастает при переходе от видимого к ультрафиолетовому спектральному диапазону и при этом разброс оптических характеристик нефтей является существенным.

В работе [14] показано, что для обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности наиболее эффективно использование безопасной для зрения длины волны излучения 0,355 мкм в ультрафиолетовом спектральном диапазоне [17]. Лазерный метод на длине волны 0,355 мкм может надежно обеспечить обнаружение пленок нефти с толщиной не менее 2 мкм с приемлемыми вероятностью правильного обнаружения (более 0,9) и ложных тревог (менее 0,002) при относительном шуме измерений не более 5%. В тоже время при лазерном зондировании, например, на длине волны 1,54 мкм (безопасной для зрения, но уже в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне) вероятность правильного обнаружения пленок нефти с толщиной ~ 2 мкм может принимать любые значения в интервале 0...1 (в зависимости от случайной толщины пленки в точке зондирования).

Поэтому в статье проводится оценка влияния типа нефти на коэффициент отражения трехслойной системы «воздух-нефть-вода» и вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги нефтяных загрязнений на водной поверхности для наиболее перспективной (для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности) длины волны излучения 0,355 мкм.

Рассматриваемая задача представляет интерес для практических приложений, так как на сегодняшний день не совсем понятно, может ли быть единый алгоритм обнаружения для всех типов нефтепродуктов или он должен зависеть от типа нефтепродукта.

#### 2. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ «ВОЗДУХ-ПЛЕНКА НЕФТИ-ВОДА» ОТ ТИПА НЕФТИ

Как видно из приведенных рисунков 1-4, наиболее сильное влияние типа нефти на оптические характеристики проявляется в УФ диапазоне (наиболее перспективном для использования в задаче обнаружения разливов нефти на водной поверхности).

Проведем оценку влияния типа нефти на коэффициент отражения трехслойной системы «воздух-пленка нефти-вода» для длины волны зондирования 0,355 мкм.

Коэффициент *R*(*d*) отражения трехслойной системы «воздух-пленка нефти-вода» имеет вид (см., например, [18,19])

$$R(d) = \frac{\left| (Z_1 + Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d} \right|^2}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)e^{-i\alpha(\lambda)d} + (Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)e^{+i\alpha(\lambda)d}}$$
(1)

где  $Z_j = \frac{1}{m_j}; \ \alpha(\lambda) = \frac{2\pi}{\lambda}m_2$ 

*d* – толщина пленки нефтепродукта;

 $n_j$ ,  $k_j$  – показатели преломления и поглощения j-ой среды;

 $m_{j} = n_{j} + ik_{j}$ - комплексный показатель

преломления *j*-ой среды (для воздуха  $m_1 = n_1 = 1$ ).

Индексы 1,2,3 относятся соответственно к воздуху, нефти и воде.

Для примера на рис. 5 и 6 приведены результаты расчетов зависимости коэффициента отражения системы «воздух-пленка нефти-вода»



Зависимость коэффициента отражения «воздух-пленка нефти-вода» для нефти 640



Зависимость коэффициента отражения «воздух-пленка нефти-вода» для нефти 192

для длины волны зондирования 0,355 мкм от толщины пленки для 640 и 192 нефти.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5 и 6, показывают, что хотя общий вид зависимости коэффициента отражения системы «воздух-пленка нефти-вода» для двух приведенных типов нефтепродуктов, естественно, сохраняется, но в тоже время зависимости сильно отличаются (отличаются даже асимптотические значения коэффициентов отражения, к которым стремятся эти зависимости).

Для оценки влияния типа нефтепродуктов на возможности лазерного метода контроля нефтяных загрязнений на водной поверхности проведилось математическое моделирование.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ПРАВИЛЬНОГО ОБНА-РУЖЕНИЯ ПЛЕНКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ И ВЕРОЯТНОСТИ ЛОЖНЫХ ТРЕВОГ

Работа лазерного метода обнаружения нефтяных разливов на водной поверхности основана на наличии контраста между мощностью принимаемого лазерного сигнала от чистой водной поверхности и водной поверхности с пленой нефти. Контраст возникает из-за отличия коэффициентов отражения чистой водной поверхности и водной поверхности с пленкой нефти и из-за сглаживания пленкой нефти волнения поверхности (см., например, [6,18]).

Контраст К «чистая водная поверхность – водная поверхность с пленкой нефти» в большинстве работ определяется следующим образом:

$$K = \frac{P_{oil}}{P_{W}}$$

где

*P<sub>w</sub>*, *P<sub>oil</sub>* – мощности принимаемого лазерного сигнала от чистой водной поверхности и от водной поверхности с пленкой нефти, соответственно.

Формула для контраста К «чистая водная поверхность – водная поверхность с пленкой нефти» при вертикальном моностатическом зондировании взволнованной морской поверхности имеет вид [14])

$$\begin{aligned} & \mathsf{F}_{R}^{\mathsf{T}_{\mathsf{de}}} = \frac{R_{oil}}{R_{w}} ; \\ & K_{\gamma,\sigma} = \frac{(\gamma_{wx}^{2} \gamma_{wy}^{2})^{1/2}}{(\gamma_{oilx}^{2} \gamma_{oily}^{2})^{1/2}} [\frac{\tau^{2} c^{2} / 16 + 2\sigma_{w}^{2}}{\tau^{2} c^{2} / 16 + 2\sigma_{oil}^{2}}]^{1/2} \end{aligned}$$

(2)

 $K = K_{R}K_{v\sigma}$ 

 $\sigma^2$ ,  $\gamma^2_{x,y}$  – дисперсии высот и наклонов (по некоторым осям *x*,*y*) морского волнения;

*R* – коэффициент отражения для плоского участка водной поверхности, ориентированного перпендикулярно направлению облучения;

 $\tau$  – длительность импульса лазерного локатора. Одним из множителей в формуле (2) является  $K_{y,\sigma}$ . Он описывает контраст «чистая водная поверхность - пленка нефти», вызванный сглаживанием пленкой нефти волнения водной поверхности. На сегодняшний день не очень понятно, как эта величина зависит от толщины пленки, но она всегда (из-за сглаживания пленкой нефти волнения) больше 1.

Второй множитель в формуле (2)  $K_R$  описывает контраст «чистая водная поверхность - пленка нефти», вызванный различием в коэффициентах отражения чистой водной поверхности и водной поверхности с пленкой нефти. Именно этот множитель зависит от оптических характеристик нефтепродуктов и длины волны излучения лазера.

Математическое моделирование вероятности правильного обнаружения  $P_{\rm no}$  (вероятности обнаружения нефтяного загрязнения, когда оно действительно есть на поверхности) и вероятности ложных тревог  $P_{\rm nt}$  (вероятности обнаружения нефтяного загрязнения, когда в действительности его нет) в условиях шумов измерения проводилось на безопасной для зрения длине волны зондирования 0,355 мкм.

Считалось, что шум измерения имеет нормальное распределение с нулевым средним значением. Относительное среднеквадратическое значение шумов измерения о задавалось в диапазоне 1-10%.

При математическом моделировании значение толщин пленок нефти на морской поверхности задавалось в диапазоне 0,1-100 мкм (более толстые пленки эффективно обнаруживаются, например, радиотепловыми методами).

Решение о наличии пленки нефтепродукта принималось при выполнении условия  $K_R > K_{nop}$ , где пороговое значение контраста  $K_{nop}$  выбиралось посредине между 1 и минимальным значением контраста (значением  $K_R$ ) в отсутствие шумов для заданного минимального значения толщины пленок (которые должны быть обнаружены по данным дистанционного зондирования).

На рис. 7 и 8 для разных типов нефти приведены результаты математического моделирования (по 1000 реализаций шума измерения) вероятностей правильного обнаружения  $P_{\rm no}$  и вероятности ложных тревог  $P_{\rm nr}$  при относительном среднеквадратическом значении шума измерения  $\sigma = 10$  % для задачи обнаружения пленок нефти с толщиной не менее 2 мкм.





Приведенные рисунки показывают, что хотя вероятности правильного обнаружения  $P_{\rm no}$  и вероятности ложных тревог  $P_{\rm лт}$  для разных типов нефти различны, но отличие невелико. Физически это связано с тем, что при моделировании задавалось равномерное распределение возможных толщин нефтяных пленок (что на самом деле и есть). Поэтому изменение положения максимумов и минимумов в зависимости коэффициента отражения системы «воздух-пленка нефти-вода» мало влияет на вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог. Однако, асимптотические значения коэффициентов отражения все же (хотя и слабо) зависят от типа нефти. Это и приводит к разных значениям вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог для различных типов нефти.

Таким образом, для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности лазерным методом на безопасной для зрения длине волны излучения 0,355 мкм может быть использован один пороговый алгоритм обнаружения для всех типов нефтепродуктов.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено математическое моделирование для оценки влияния типа нефти на коэффициент отражения трехслойной системы «воздухнефть-вода» и характеристики обнаружения лазерным методом нефтяных загрязнений на водной поверхности на длине волны излучения 0,355 мкм. Показано, что зависимости коэффициента отражения «воздух-пленка нефти-вода» от толщины пленки нефтепродукта могут сильно отличаются для разных типов нефти. Однако, вероятности правильного обнаружения и вероятности ложных тревог для разных типов нефти отличаются незначительно. Таким образом, для задачи обнаружения нефтяных загрязнений на водной поверхности лазерным методом на безопасной для зрения длине волны излучения 0,355 мкм может быть использован один пороговый алгоритм обнаружения для всех типов нефтепродуктов.

#### Список литературы:

1. *Немировская И.А.* Нефть в океане (загрязнение и природные потоки). М.: Изд-во Научный мир, 2013. 432 с.

2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в российской федерации за 2015 год. М.:РОСГИДРОМЕТ. 2016. 204 с.

3. Нефть и экология. Режим доступа: http://www. rusnauka.com/ **17\_PNR\_2008/Ecologia/34369.doc.** htm (дата обращения 26.10.2016).

4. Загрязнение морей и океанов. Режим доступа: http://www.o8ode.ru/article/planetwa/zagraznenie\_ morei i okeanov.htm (дата обращения 26.10.2016).

5. *Measures R.M.* Laser remote sensing. Fundamentals and applications. Krieger Publishing Company. Malabar. Florida. 1992. 510 p.

6. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов, В.А. Городничев, Б.В. Стрелков. М.: Из-во МГТУ, 2002. 528 с.

7. Березин С.В. Разработка дистанционного лазерного измерителя толщины нефтяных пленок на взволнованной морской поверхности. М. 2006. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. 115 с.

8. *Матросова О.А.* Методы контроля нефтяных загрязнений земной поверхности, основанные на явлении лазерно-индуцированной флуоресценции: дис. канд. техн. наук. М., 2013. 178 с.

9. Федотов Ю.В., Матросова О.А., Белов М.Л., Городничев В.А. Метод обнаружения нефтяных загрязнений на земной поверхности, основанный на регистрации флуоресцентного излучения в трех узких спектральных диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т.26, N3. С.208-212.

10. Fadeev V.V., Burikov S.A., Volkov P.A., Lapshin V.B., Syroeshkin A.V. Raman Scattering and Fluorescence Spectra of Water from the Sea Surface Microlayer // Oceanology. 2009. Vol. 49, No. 2. P. 205 – 210.

11. *Utkin A.B., Lavrov A., Vilar R*. Evaluation of oil spills by laser induced fluorescence spectra // Proceedings of SPIE. 2011. Vol. 7994, P. 799415-1 - 799415-10.

12. *Polombi L., Lognoli D., Raimondi V.* Fluorescence LIDAR remote sensing of oils: merging spectral and time-decay measurements // Proceedings of SPIE. 2013. Vol. 8887, P. 88870F-1 - 88870F-8.

13. Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K., Musayev A., Sadikhov I. LIDAR for remote sensing of contaminations on water and earth surface taking place during oil-gas production // Proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9810, P. 981018-1 - P. 981018-7.

14. Белов М.Л., Всякова Ю.И., Кравцов Д.А., Городничев В.А., Готальская О.В. Сравнительный анализ вероятности обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности лазерным рефлектометрическим методом на безопасных для зрения длинах волн // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 1. С.77-91. DOI:10.7463/0117.0000911.

15. Альперович Л.И., Комарова А.И., Нарзиев Б.Н., Пушкарев В.Н. Оптические постоянные нефтей в области 0,25-25 мкм // Журнал прикладной спектроскопии. 1978. № 4. С. 719-723.

16. Золотарев В.М., Морозов В.Н., Смирнова Е.В. Оптические постоянные природных и технических сред. Справочник. Л.: Химия, 1984. 216 с.

17. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. ГОСТ 31581-2012. М.: Стандартинформ, 2013.

18. *Гуревич И.Я., Шифрин К.С.* Отражение видимого и ИК излучения нефтяными пленками на море. // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. С.166-176.

19. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Смирнова О.А., Федотов Ю.В. Лазерный метод измерения толщины пленок нефти на взволнованной морской поверхности, основанный на определении разности набега фаз в пленке для длин волн зондирования. // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, N10. C.932-935.

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАТИСТИКИ ФЛУКТУАЦИЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ УЗКОПОЛОСНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА СИГНАЛ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СТЕПАНОВ К.В., БОРИСОВА А.В., ЖИРНОВ А.А., ЧЕРНУЦКИЙ А.О., НЕСТЕРОВ Е.Т., ПНЕВ А.Б.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: thefrost@list.ru

**Аннотация:** Исследовано влияние статистики флуктуаций длины волны узкополосного лазерного источника на регистрируемые результаты фазочувствительных рефлектометрических систем.

**Ключевые слова:** фазочувствительный рефлектометр, узкополосный лазер, распределенный датчик.

# STUDY OF WAVELENGTH FLUCTUATION STATISTICS OF NARROW LINE LASER INFLUENCE ON PHASE-SENSITIVE OTDR SYSTEM SIGNAL

STEPANOV K.V., BORISOVA A.V., ZHIRNOV A.A., CHERNUTSKY A.O., NESTEROV E.T, PNEV A.B.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: thefrost@list.ru

**Abstract:** The effect of the wavelength fluctuation statistics of a narrow-linewidth laser on the signal of phase-sensitive OTDR systems was studied.

Keywords: phase-sensitive OTDR, narrow-band laser, distributed sensor.

#### ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий особое внимание уделяется распределенным волоконно-оптическим системам, которые имеют большое значение для мониторинга протяженных объектов [1-6]. Одними из наиболее многообещающих методов измерения являются методы, основанные на эффектах обратного рассеяния [1,7]. Приборы, работающие на основе данных методов, называются рефлектометрами. В большинстве устройств такого типа используются источники света со временем когерентности меньше длительности импульсов [7]. В результате обратного рассеяния волн в сенсоре в пределах полуширины импульса происходит сложение интенсивностей. На основании этих данных можно получить информацию о наличии дефектов волокна: сварок, сильных изгибов, разрывов и других. Более перспективными в задачах мониторинга являются фазочувствительные рефлектометры, работающие на когерентном рассеянии света [3-6, 8-10]. В этом случае время когерентности лазеров больше длительности импульса.

Такие системы могут использоваться для контроля вибрации протяженных объектов в реальном времени, например, мостов, трубопроводов, ограждений периметров и других [1,2]. Акустическая волна, возникающая из-за событий вблизи волокна, изменяет фазы центров обратного рассеяния. Анализ последовательности обратнорассеянных сигналов для любого определённого участка может выявить наличие воздействующей на датчик акустической волны и, как следствие, наличие источника возникновения этой волны. Для повышения чувствительности таких устройств следует использовать высокостабильные по частоте узкополосные лазеры [2]. Источники такого типа в данный момент производятся широким кругом компаний, однако, несмотря на заметное преимущество по стабильности и узости спектра над более простыми аналогами, могут сильно отличаться по данным параметрам друг от друга.

Целью данной работы было изучение влияния статистики собственного шума системы из-за нестабильности источника излучения, и, в частности, связь между статистикой флуктуаций длины волны лазера и флуктуациями сигнала системы.

#### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

В данной работе для сбора данных использовался макетный образец фазочувствительного рефлектометра, схема которого приведена на рисунке 1. Принцип работы фазочувствительного рефлектометра заключается в следующем: излучение от узкополосного источника доводится до необходимого уровня мощности на усилителе, зондирующие импульсы формируются акусто-оптическим модулятором. Далее циркулятор направляет зондирующий импульс в сенсорное волокно, обратнорассеянный сигнал из которого циркулятором перенаправляется на предусилитель для повышения оптической мощности, спонтанное излучение которого отсекается оптическим фильтром. Далее рефлектограмма регистрируется на приёмнике, переводится в цифровой вид на АЦП, обрабатывается на ПК оператора.

На рисунке 2 показаны так называемые «водопады» получаемые с рефлектометра. «Водопад» – трёхмерная картина сигнала, где по оси абсцисс отмечено расстояние вдоль кабеля, по оси ординат ведётся отсчёт времени, а цветом представлена интенсивность приходящего на приёмник сигнала. В качестве образца представлен сигнал без какого-либо воздействия на сенсор (слева), и с воздействием: автомобиль проезжает вдоль сенсора (справа). Сигналом от источника акустических воздействий являются флуктуации рефлектограммы на соответствующем участке сенсора.

Однако стоит отметить, что даже в отсутствии внешнего воздействия на чувствительный элемент интенсивность рефлектограммы на каждом участке может изменяться. Это обусловлено собственными шумами системы,



Рисунок 1. Схема фазочувствительного рефлектометра



Рисунок 2. Картина «водопада», получаемого с рефлектометра: слева – сигнал без воздействия на сенсор; справа – проезд автомобиля

создаваемыми приёмником излучения, волоконными усилителями, джиттером модулятора и, в основном, колебаниями длины волны источника излучения. Так как принцип формирования сигнала – интерференционное сложение обратнорассеянных волн в пределах полуширины импульса, то каждый центр рассеяния даёт вклад в результирующий сигнал. Фазу обратнорассеянной волны от этого центра можно определить как

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}l.$$

где  $\lambda$ , *м* – длина волны лазерного источника; *l*, *м* – расстояние от лазерного источника до рассматриваемого центра рассеяния.

Видно, что для поддержания стабильности сигнала необходимо не только статическое положение центров рассеяния, но и неизменная длина волны лазера. Таким образом можно выделить следующие основные типы изменений сигнала, которые может зарегистрировать прибор:

• Сигнал от внешнего воздействия, вызванный изменением положения рассеивающих центров под действием внешней акустической волны от целевого объекта.

• Шум от внешнего воздействия, вызванный изменением положения рассеивающих центров под действием внешних воздействий, которые не являются целевыми и интересующими для системы мониторинга: шум от осадков и ветра, зоны большой активности возле дорог и т.п.

• Внутренний шум системы, вызванный шумами приёмника, усилителя, а также флуктуациями длины волны лазера – основным рассматриваемым в данной статье эффектом.

Из этих трёх типов первые два являются воздействиями, и всё же вне зависимости от их природы система должна их зарегистрировать. Наиболее интересной является задача отделения воздействий от изменений, вызванных флуктуациями частоты лазера, которые могут приводить к генерации ложных срабатываний. С данной целью было проведено исследование связи между статистикой флуктуаций частоты лазерного источника и флуктуаций сигнала, регистрируемого фазочувствительным рефлектометром.

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

В работе рассматривались статистики флуктуаций для двух типов данных:

 Наличие различных типов внешних воздействий при минимальном частотном шуме лазера. Для этого эксперимента в установки был применён лазерный источник с самой большой стабильностью частоты излучения (менее 1 МГц/мин),

• Одинаковые внешние воздействия при различных характеристиках стабильности лазерных источников.

Рассмотрим результаты, полученные в каждой серии экспериментов.

## Сигнал при использовании высокостабильного лазерного источника

На рисунке 3 представлен сигнал в виде водопада, а также его сечения на 947 метре, где можно увидеть следующую последовательность воздействий: проезд автомобиля, участок без воздействий, удары ковшом экскава-



Рисунок 3. Слева – сигнал в виде водопада; справа – его сечение на 947 метре

тора. Видно, что проезд автомобиля является для сенсора непрерывным событием большой интенсивности, изменяющим регистрируемую амплитуду, фактически, в каждый момент получения сигнала. Удары же являются локализованными во времени событиями, промежутки между ними являются участками с отсутствием сигнала.

Для анализа были выбраны участки с 1 по 4000 рефлектограммы (4 секунды движения автомобиля), с 5000 по 9000 (4 секунды отсутствия воздействий) и с 20000 по 24000 рефлектограммы (4 секунды с периодическими ударами). Для данных участков были построены гистограммы распределения интенсивностей, представленные на рисунке 4. Для сравнения с флуктуациями частоты источника излучения, гистограмма их распределения представлена на рисунке 5. Сравнение полученных графиков показывает, что в отсутствие внешних воздействий вид гистограммы сигнала повторяет вид гистограммы флуктуаций длины волны лазерного источника. При наличии эпизодических воздействий – наблюдается размытие основного пика гистограммы и появление побочных пиков. При наличии постоянного воздействия наблюдается полное перераспределение значений интенсивности по сравнению с флуктуациями длины волны источника.



Справа - их гауссова аппроксимация. Сверху вниз – при движении автомобиля; в отсутствии воздействий; с периодическими ударами.



Рисунок 5. Гистограмма флуктуаций частоты излучения лазера и её гауссова аппроксимация

## Сигнал при использовании источников с различной стабильностью

Дополнительно к высокостабильному источнику были исследованы лазеры с большими флуктуациями. Первый источник излучения из-за недостаточной температурной стабилизации имел дрейф частоты излучения около 50 МГц/мин, но на коротких интервалах был сравним с первым источником, отклоняясь не более чем на 1 МГц/с. Для такого лазера гистограмма отклонений длины волны похожа на равномерное распределение, как представлено на рисунке 6. Из-за этого в отсутствие воздействий форма сигнала также стремится стать равномерной, степень отклонения от гауссоиды определяется скоростью температурного дрейфа длины волны. В данном случае дрейф был относительно невелик и сильных колебаний сигнала не наблюдалось. При внешнем ударном воздействии на кабель видны перераспределения интенсивностей в гистограмме, искажающие её начальную форму, по которым можно идентифицировать наличие внешнего воздействия.



#### Рисунок 6.

Слева – гистограммы распределения интенсивности сигналов для лазера с дрейфом частоты на коротких интервалах не более чем на 1 МГц/с. Справа - их гауссова аппроксимация.

Сверху вниз – отклонения частоты излучения; сигнал без воздействий; сигнал с воздействиями.

Далее был рассмотрен сигнал, получаемый от лазерного источника с большими как долгосрочными (50МГц/мин), так и краткосрочными (20 МГц/с) флуктуациями частоты лазера. В этом случае гистограмма распределения отклонений частоты выглядит схоже с предыдущим. Однако из-за больших флуктуаций оценить изменение сигнала между рефлектограммами не представляется возможным, так как даже в отсутствие воздействий они постоянно изменяют свою форму, трансформируясь то в равномерное распределение, то в гауссоиду, то в большое количество других вариантов, как представлено на рисунке 7. Таким образом, в данном случае анализ гистограмм не позволяет сделать выводы о наличии или отсутствии воздействия, но тот же результат даёт и анализ релфектограмм, следовательно, такой лазер для фазочувствительной рефлектометрии использоваться, скорее всего, не будет.

#### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для численного сравнения полученных гистограмм была проведена их аппроксимация распределением гаусса по выражению:

$$f(x) = a + exp\left(-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right),$$

где *x* – значение величины, для которой рассматривается распределение, для частоты х имеет размерность [Гц], для отсчетов х имеет размерность [отн. ед.];

а – число отсчётов [шт.];

*b* – смещение центра распределения, для частоты *b* имеет размерность [Гц], для отсчетов *b* имеет размерность [отн. ед.];

*с* – полуширина распределение, для частоты *с* имеет размерность [Гц], для отсчетов *с* имеет размерность [отн. ед.].

В таблице 1 приведены данные для трех использованных источников излучения.

Из данных таблицы, а также представленных ранее графиков, можно сделать вывод, что



#### Рисунок 7.

Слева – гистограммы распределений для лазера с большими как долгосрочными (50МГц/мин), так и краткосрочными (20 МГц/с) флуктуациями частоты излучения . Справа - их гауссова аппроксимация. Сверху вниз – отклонения частоты излучения; сигнал без воздействий; сигнал с воздействиями.

#### Таблица 1. Данные аппроксимации для трех использованных источников излучения

Данные	Амплитуда, шт.	Смещение, Гц	Полуширина, Гц
Отклонения длины волны лазера 1	57,84	1,1·10 <sup>4</sup>	1,9·10 <sup>5</sup>
Отклонения длины волны лазера 2	29,86	-6,0·10 <sup>5</sup>	1,8·10 <sup>7</sup>
Отклонения длины волны лазера 3	45,97	$-4,8\cdot10^{6}$	1,3·10 <sup>7</sup>

Таблица 2. Данные аппроксимации сигнала с различными типами источников

Данные	Амплитуда, шт.	Смещение, о.е.	Полуширина, о.е.
Сигнал с лазера 1без возлействия	367,4	$3,7.10^4$	$2,5 \cdot 10^3$
Сигнал с лазера 1 при ударах	290,0	4,4·10 <sup>4</sup>	$2,3 \cdot 10^3$
Сигнал с лазера 1 при проезде машины	55,39	$5,5 \cdot 10^4$	$2,2.10^4$
Сигнал с лазера 2 без воздействия	305,4	$1,8.10^{4}$	$7,7.10^{2}$
Сигнал с лазера 2 при ударах	199,7	$2,0.10^4$	$1,1.10^{3}$
Сигнал с лазера 3 с воздействием 1	87,2	$3,2.10^4$	$2,6.10^3$
Сигнал с лазера 3 с воздействием 1	119,4	3,0·10 <sup>4</sup>	1,5·10 <sup>3</sup>

лучше всего аппроксимируются данные лазера 1, что видно и из наименьшей полушириы флуктуаций данного источника.

Для оценки влияния статистики изменения длины волны на изменения регистрируемого сигнала можно проанализировать приведённые в таблице 2 данные аппроксимации сигнала с различными типами источников и несколькими типами воздействия, а также параметры шумового сигнала.

Сравнение полученных данных, а также сравнение того, как много точек распределения отклоняется от аппроксимации гауссоидой, позволяет сделать вывод о наличии и отсутствии воздействия при условии источника с небольшим отклонениями длины волны. Уширение распределения по сравнению с шумовым (исходным) говорит о наличии внешнего воздействия на сенсор. О том же говорит и появление большого числа точек, не лежащих на аппроксимационном графике.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известное статистическое распределение флуктуаций длины волны лазерного источника позволяет сделать вывод об источнике отклонений интенсивности рефлектограммы: если гистограммы флуктуаций интенсивности и частоты излучения источника повторяют форму друг друга, то данное отклонение является собственным шумом системы, а если их формы различаются, то источником является внешнее воздействие на сенсорное волокно. Данная закономерность может быть применена для удалённого определения зашумлённых внешними воздействиями областей сенсорной системы на основе фазочувствительного рефлектометра или для предварительной обработки сигнала с целью фильтрации и поиска областей для распознавания событий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00688.

#### Список литературы:

1. Bao X., Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors //Sensors. – 2012. – T. 12. – Nº. 7. – C. 8601-8639.

2. Shi Y., Feng H., Zeng Z. A long distance phasesensitive optical time domain reflectometer with simple structure and high locating accuracy //Sensors. – 2015. – T. 15. – N. 9. – C. 21957-21970.

3. Taylor H F and Lee C E 1993 U.S. Patent 5, 194847

4. *Park J., Lee W., Taylor H. F.* Fiber optic intrusion sensor with the configuration of an optical timedomain reflectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering //Optical and Fiber Optic Sensor Systems. – International Society for Optics and Photonics, 1998. – T. 3555. – C. 49-57.

5. *Choi K. N., Taylor H. F.* Spectrally stable Er-fiber laser for application in phase-sensitive optical timedomain reflectometry //IEEE Photonics technology letters. – 2003. – T. 15. – №. 3. – C. 386-388.

6. Choi K. N., Juarez J. C., Taylor H. F. Distributed fiber optic pressure/seismic sensor for low-cost

monitoring of long perimeters //Unattended Ground Sensor Technologies and Applications V. – International Society for Optics and Photonics, 2003. – T. 5090. – C. 134-142.

7. *Gold M*. Design of a long-range single-mode OTDR //Journal of lightwave technology. – 1985. – T. 3. – №. 1. – C. 39-46.

8. *Nesterov E. T. et al.* Experimental study of influence of nonlinear effects on phase-sensitive optical time-domain reflectometer operating range //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2015. – T. 584. – №. 1. – C. 012028.

9. *Zhirnov A. A. et al.* Adaptation of the Er-Yb microchip laser for use in phase-sensitive optical time domain reflectometry //Laser Optics (LO), 2016 International Conference. – IEEE, 2016. – C. R1-5-R1-5.

10. Fedorov A.K. et al. Note: Gaussian mixture model for event recognition in optical time-domain reflectometry based sensing systems //Review of Scientific Instruments. – 2016. – T. 87. – №. 3. – C. 036107.



## ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЖИДКОСТНГО ТРАВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН

#### ОДИНОКОВ С.Б., САГАТЕЛЯН Г.Р., ДРОЗДОВА Е.А., БЕТИН А.Ю.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

**E-mail:** h\_sagatelyan@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена возможность изготовления голограммных оптических элементов (ГОЭ) из кремния. На основе экспериментальных исследований предложен состав травящего раствора, состоящего из плавиковой, азотной и уксусной кислот. Наиболее целесообразно использовать маску из фоторезиста, создавая рельеф глубиной 160 – 250 нм.

**Ключевые слова:** голограммные оптические элементы, кремниевые пластины, жидкостное травление, трёхкомпонентный травитель, двухуровневый узор, восстановление изображения, глубина микрорельефа, качество восстановления.

## LIQUID ETCHING OF SILICON AT MANUFACTURING OF HOLOGRAM OPTICAL ELEMENTS

#### S.B. ODINOKOV, H.R. SAGATELYAN, YE.A. DROZDOVA, A.YU. BETIN

#### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

**E-mail:** h\_sagatelyan@mail.ru

**Abstract:** Technological possibilities of liquid etching to be used in process technology of manufacturing the holographic optical elements (HOE) working on reflection and made of silicon are investigated. The etcher consisting of three components is developed: hydrofluoric, nitric and acetic acids. The rational proportion between the contents of the components in etchant was established experimentally. The quality of image, restored by HOE, was considered as an optimization parameter. The possibilities of liquid etching of silicon through a chrome mask and through a photoresist mask are investigated. It is shown that the reason for the decrease in the quality of the restored image with an increase in the depth of the functional relief is isotropic character of liquid etching: with an increase in the depth of the relief, distortions of the pattern of the working surface increase. It is established that the highest quality of image restoration is achieved by using a mask made of photoresist and the depth of the relief corresponding to a quarter of the wavelength of the restoring radiation, i.e. 160-250 nm.

**Keywords:** holographic optical elements, silicon plates, liquid etching, three-component etchant, twolevel pattern, image restoration, depth of microrelief, quality of restoration.

#### ВВЕДЕНИЕ

Голограммные оптические элементы (ГОЭ) осуществляют преобразование любого входного волнового фронта оптического излучения в любой выходной волновой фронт [1, 2]. ГОЭ для индикаторов знако-символьной информации [3, 4] обеспечивают получение изображения изнутри на лобовых стёклах, на стёклах очков, в оптических прицелах [5, 6, 7].

Используя фото-термо-рефрактивное стекло [8] можно изготавливать ГОЭ в виде объёмной фазовой голограммы [9]. Такие ГОЭ работают на прохождение. По нашему мнению, заслуживает внимание применение ГОЭ, работающих на отражение по схеме, представленной на рис. 1. Коллимирующая система с углом расходимости 30° формируется двумя оптическими



Рисунок 1. Оптическая схема прибора с отражающим ГОЭ: 1 – SMD-светодиод; 2 – колиимирующая система; 3 – ГОЭ; 4 – полупрозрачная пластина; 5 – наблюдатель; 6 – объект

линзами, предусмотренными конструкцией таких SMD-светодиодов [10]. Отражающий ГОЭ можно изготавливать из полированных пластин монокристаллического кремния.

Изображение прицельного знака (рис. 2, *a*) может быть получено при прохождении монохроматического пучка света через трафарет (рис. 2, *б*), изготовленный методом электронно-лучевой литографии на заготовке фотошаблона полупроводниковых интегральных микросхем [11, 12].

В отличие от трафарета, представленного на рис. 2, *б*, рабочая поверхность ГОЭ (поз.3 на рис. 1) должна иметь двухуровневый отражающий рельеф. Верхнему и нижнему уровням рельефа должны соответствовать чёрный и белый цвета узора, показанного на рис. 2, *б*.

#### ТЕХНОЛОГИЯ ОТРАЖАЮЩЕГО ГОЭ

Технологический процесс изготовления предлагаемого ГОЭ включает следующую последовательность этапов: нанесение фоторезиста, его экспонирование через фотошаблон, проявление и промывка (с локализованным удалением фоторезиста на полную глубину), травление кремния через маску из фоторезиста. Для увеличения глубины рельефа может применяться маска из хрома. Ключевой является операция травления кремния через маску из фото- или металло- резиста.

Плазмохимическое (сухое) травление [13, 14] применяют, когда при создании рисунка необходимо обеспечить разрешающую способ-



Рисунок 2. а) - восстановленное изображение, б) - его амплитудный трафарет

ность менее 2 мкм. В нашем случае элементы узора (зазоры между островками, минимальная ширина островков, наиболее мелкие фрагменты контура островков) имеют минимальные значения не менее 7-8 мкм. Соответственно, предпочтительным представляется способ жидкостного травления [15].

Жидкостное травление кремния для создания оптических деталей оптико-электронных приборов ранее не исследовалось. Поэтому технологические возможности жидкостного травления кремния по обеспечению требуемых функциональных свойств ГОЭ необходимо установить экспериментально.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с существующими рекомендациями [16] в качестве травителя рассматривали смесь плавиковой, азотной и уксусной кислот. Был реализован план эксперимента 2<sup>3</sup> [17] с применением маски из фоторезиста. Для всех опытов было принято *t*<sub>тр</sub> = 20 с.

Выходным параметром являлось качество восстановления изображения, которое оценивали экспертным методом величиной Q по стобалльной шкале. В качестве факторов  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  рассматривались количества частей HF, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>COOH соответственно. Были приняты следующие диапазоны изменения значений факторов:  $X_1 = 1 - 3$  ч.;  $X_2 = 8 - 10$  ч.;  $X_3 = 3 - 5$  ч.

Полученная математическая модель была проверена на адекватность. При этом значимыми оказались все коэффициенты регрессии, а именно - при всех трёх факторах при всех их парных взаимодействиях и при их тройном взаимодействии.

Наилучшее качество получено при следующем количестве частей компонентов:

HF – 1 ч.; HNO<sub>3</sub> – 10 ч.; CH<sub>3</sub>COOH – 3 ч.

Дальнейшие экспериментальные исследования производили, применяя именно это соотношение компонентов.

Исследовали влияние продолжительности операции травления на качество восстановленного изображения. Время травления варьировали в пределах  $t_m = 14 - 23$  с.

Глубины микрорельефа *H*, сформированные в результате травления, измеряли на профилографе - профилометре. Из рассмотрения табл. 1 видно, что может быть обеспечено высокое (*Q* = 98%) качество восстановления изображения.



Таблица 1. Результаты изготовления ГОЭ травлением через маску из фоторезиста Оказалось, что наиболее высокое качество восстановленного изображения обеспечивается при приближении глубины рельефа к четверти длины волны. При глубинах рельефа порядка половины длины волны качество восстановленного изображения несколько снижается (*Q* = 85 – 90%). При глубинах рельефа порядка трёх четвертей или пяти четвертей длины волны качество изображения вновь повышается (*Q* = 93 - 95%).

Применение маски из хрома взамен маски из фоторезиста не приводило к повышению качества восстановленного изображения при глубинах рельефа до 1 мкм.

Более глубокий рельеф получали увеличением продолжительности процесса травления, применяя маску их хрома. Оказалось, что с увеличением времени травления в диапазоне от 10 до 80 секунд глубина рельефа увеличивается по прямо пропорциональной зависимости до 5,0 мкм.

Было установлено, что качество восстановленного изображения при увеличении глубины рельефа свыше 1 мкм монотонно снижается, причём более интенсивно при применениии маски из фоторезиста.

Характерные изменения узора по этапам получения ГОЭ травлением через хромовую маску при различной продолжительности  $t_{\rm тр}$  процесса травления приведены в табл. 2. Можно видеть, что нанесение и экспонирование фоторезиста приводит к формированию узора, несколько отличающегося от исходного, задаваемого фотошаблоном, узор которого представлен на рис. 2, б. Последующее жидкостное травление хрома через сформированную таким образом маску из фоторезиста приводит к ещё большему отклонению конфигурации узора от исходной. Следующее затем травление кремния через хромовую маску приводит к дальнейшему росту отклонений конфигурации сформированного узора от исходной.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученное уравнение регрессии указывает на то, что наибольшее влияние на качество восстановления изображения оказывает концентрация НF в травильном растворе - с увеличением содержания HF качество восстановленного изображения снижается. Это объясняется изотропным характером жидкостного травления [18]: удаление обрабатываемого материала происходит не только в направлении, перпендикулярном к обрабатываемой поверхности, но и в направлении, параллельном ей, под защитной маской. Травление кремния в направлении, параллельном функциональной плоскости, приводит к искажению узора микрорельефа, задаваемого узором защитной



#### Таблица 2. Результаты изготовления ГОЭ травлением через хромовую маску
маски. Итоговый узор травлённой поверхности кремния отличается от узора маски, причём чем больше это отличие, тем ниже получается качество восстановленного изображения. Очевидно, что повышение концентрации НF приводит к повышению скорости травления кремния, а, следовательно, и к увеличению искажений узора, заданного маской, т.е. к снижению качества восстановленного изображения.

Влияние концентрации HNO<sub>3</sub> в травильном растворе на качество восстановленного изображения само по себе не велико и сводится к тому, что с увеличением содержания HNO, качество восстановленного изображения немного снижается. Такой характер влияния содержания HNO, объясняется тем обстоятельством, что эта кислота воздействует на маску из фоторезиста, искажая её изначальный узор. Чем больше содержание HNO<sub>3</sub>, тем большее искажение претерпевает узор маски в процессе опыта, и тем ниже получается качество восстановленного изображения, поскольку под воздействие основного травителя - кислоты HF – попадают не предназначенные для этого участки функционального рельефа.

Ещё меньшее влияние на качество восстановленного изображения оказывает сама по себе концентрация СН<sub>3</sub>СООН в травильном растворе.

В то же время, взаимодействия факторов влияют на качество восстановленного изображения существенно.

Из парных взаимодействий наиболее сильно на качество восстановленного изображения влияет взаимодействие факторов содержания HF и содержания CH, COOH. Повышению качества восстановленного изображения способствует одновременное повышение содержания HF и CH<sub>2</sub>COOH или же одновременное уменьшение содержания этих кислот в травителе. Такой характер взаимодействия этих факторов объясняется ролью уксусной кислоты в составе травителя. Эта роль сводится к торможению высокоскоростного травления, характерного для взаимодействия с кремнием плавиковой кислоты. Очевидно, что, при повышении концентрации HF, для предотвращения чрезмерного искажения узора функционального рельефа, содержание CH<sub>3</sub>COOH также должно быть повышено. Одновременно, при снижении концентрации HF, для достижения оптимальной глубины травления, содержание CH<sub>3</sub>COOH также должно быть снижено.

Также существенное влияние на качество восстановленного изображения оказывают два остальных парных взаимодействия: факторов концентрации HF с концентрацией HNO, и концентрации HNO<sub>3</sub> с концентрацией CH<sub>3</sub>COOH. При повышении содержания HF к повышению качества изображения приводит уменьшение содержания HNO<sub>3</sub>. Это обусловлено тем, что при повышенных концентрациях плавиковой кислоты следует поддерживать заданный узор маски из фоторезиста за счёт уменьшения содержания азотной кислоты. Повышение содержания СН<sub>3</sub>СООН ограничивает скорость растворения маски из фоторезиста азотной кислотой, приводя к повышению качества восстановленного изображения за счёт опосредованного уменьшения искажений функционального узора в кремнии.

Весьма значимым оказалось тройное взаимодействие факторов. Это обусловлено тем, что два компонента – и HNO<sub>3</sub>, и CH<sub>3</sub>COOH фактически являются замедлителями скорости реакции кремния с плавиковой кислотой. Очевидно, что при увеличении концентрации плавиковой кислоты увеличение суммарной концентрации замедлителей способствует снижению искажения узора функционального рельефа на поверхности кремнии от непосредственного воздействия HF.

В итоге наилучшим оказалось сочетание факторов, при котором было достигнуто оптимальное замедление скорости травления кремния плавиковой кислотой при её относительно низкой концентрации.

Анализируя выявленную волнообразную зависимость качества восстановления изображения от глубины функционального микрорельефа, необходимо отметить, что при оценке качества восстановленного изображения, исходили из того, что оно повышается при уменьшении доли интенсивности светового пучка, приходящейся на нулевой порядок, и увеличении интенсивности дифрагированной доли пучка, формирующей восстанавливаемое изображение.

Известно, что для двухуровневых рельефнофазовых дифракционных решеток, работающих на отражение, интенсивность нулевого порядка дифракции минимальна при глубине рельефа, равной четверти длины волны в воздухе падающего излучения [19]. Это обусловлено тем, что монохроматические волны, отраженные от верхнего и нижнего уровней рельефа, распространяются в противофазе, поскольку отражённая от нижнего уровня рельефа часть волны проходит лишнюю четверть длины волны при движении вниз и четверть длины волны при движении вверх. Рассматриваемый вариант отражающего ГОЭ работает как множество дифракционных решёток различного периода и направленности канавок.

Поэтому наименьшая интенсивность в нулевом порядке дифракции будет наблюдаться при глубинах рельефа

$$H = \left(2n - 1\right)\frac{\lambda}{4} , \qquad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны; n = 1, 2, 3, ... - натуральное число.

Линейное увеличение глубины рельефа в исследованном диапазоне, т.е. до глубин *H* = 5 – 6 мкм, с увеличением продолжительности процесса свидетельствует об отсутствии явлений пассивации подвергаемой травлению поверхности во всяком случае при формировании рельефа деталей дифракционной оптики. Для определения возможностей разделения групповой заготовки – кремниевой пластины на отдельные детали методом сквозного травления [20] необходимы дальнейшие исследования.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э. Баумана при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части государственного задания № 3.4847.2017/6.7

#### выводы

1) Установлен рациональный состав травителя для изготовления работающих на отражение ГОЭ из монокристаллического кремния – это смесь кислот HF, HNO<sub>3</sub> и CH<sub>3</sub>COOH в соотношении 1:10:3 по объёму. 2) Зависимость качества восстановления Q изображения от глубины H рельефа, полученной травлением, при H < 1 мкм носит волнообразный характер с максимумами в точках  $(2n-1)\lambda/4$  и минимумами в точках  $n\lambda/2$ .

3) Качество восстановления изображения с увеличением глубины травления при жидкостном травлении кремния в целом снижается, причём при использовании маски из фоторезиста существенно интенсивнее, чем при использовании хромовой маски.

4) При глубинах рельефа до *H* = 250 нм маска из фоторезиста обеспечивает более высокое качество восстановленного изображения по сравнению с хромовой маской – до *Q* = 98%.

#### Список итературы:

1. *Корешев С.Н.* Голограммные элементы для систем космической оптики. – Мир голографии – 2017. Т.3, №1, С. 42 – 47.

2. *Корешев С.Н.* Голограммные оптические элементы и устройства. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 143 с.

3. Комбинированные голограммные оптические элементы для индикаторов знако-символьной информации / С.Б. Одиноков, А.Ю. Жердев, В.В. Колючкин и С.Б. Соломашенко. – Компьютерная оптика. 2014. Т. 38, №4. – С. 704 – 709.

4. Оптическая схема получения голографического индикатора для отображения знако-символьной информации / С.Б. Одиноков, В.В. Маркин, Д.С. Лушников, Кузнецов А.С. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2012, № 8. – С. 158 – 166.

5. Корешев С.Н., Семёнов Г.Б. Анализ интенсивности ложных изображений, формируемых объёмными голограммными оптическими элементами. – Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 60, №1, – С. 148-151.

6. *Сватеев В.* Плюсы и минусы прицела. – Военное обозрение. 2013. Декабрь. – С. 22 – 26.

7. Голограммный коллиматорный прицел / Патент РФ № 2 560 355 (Патентообладатель – ЗАО «ИнтерОПТИК»).

8. Голографические характеристики модифицированного фото термо реактивного стекла / С.А. Иванов, А.И. Игнатьев, Н.В. Никифоров и В.А. Асеев. – Оптический журнал. – Т. 81, №6, 2014. – С. 72 – 77. 9. Голографический коллиматорный прицел / Н.В. Никофоров, С.А. Иванов, А.Е. Ангервакс и А.С. Шеулин. – Патент РФ № 2 555 792. Заявл. 06.02.2014. Опубл. 10.07.2015. Бюл. № 19.

10. http://ledjournal.info/spravochnik/harakteristikisvetodiodov-smd-3528-5050-5630-5730-3014-2835. html обращение 13.03.2018

11. Получение голограммных и дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления в стекле / Г.Р. Сагателян, С.Б. Одиноков, А.С. Кузнкцов, М.С. Ковалёв, М.В. Сафт, В.В. Попов – Контенант. 2016. Т. 15, №3, – С. 8 – 12.

12. Технология интегральной электроники / Л.П. Ануфриев, С.В. Бордусов, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, А.Ф. Керенцев, Н.С. Ковальчук, А.О. Коробко, В.Л. Ланин, А.А. Осипов, Л.Я. Портнов, И.И. Рубцевич, Я.А. Соловьев, В.А. Солодуха, В.В. Становский – Минск: Интегралполиграф, 2009. – С. 201-204.

13. Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалев М.С. Расчёт, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 82 с.

14. Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов / Одиноков С. Б., Сагателян Г. Р., Гончаров А. С., Ковалев М. С., Соломашенко А. Б., Ве-

реникина Н. М. - Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5. С. 27 - 38.

15. Галперин В.А., Данилкин Е.В., Мочалов А.И. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях - М.: Бином. Лаборатория знаний. – 2013, 283 с.

16. *Варадан В*. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе – М.: Техносфера, 2004. – 528 с.

17. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 280 с.

 Surface morphology of anisotropically etched single-crystal silicon / Mitsuhiro Shikida, Kenji Tokoro, Daisuke Uchikawa and Kazuo Sato. -Journal of Micromechanics and Microengineering. – No 10, 2000.
 P. 522–527.

19. Дифракционные решетки с отражением в высоком порядке для мощных полупроводниковых лазеров / В.В. Васильева, Д.А. Винокуров, В.В. Золотарев, А.Ю. Лешко, А.Н. Петрунов, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, З.Н. Соколова, И.С. Шашкин, И.С. Тарасов - Физика и техника полупроводников. - 2012. Т. 46, вып. 2. – С. 252 – 257.

20. Бучин Э.Ю., Денисенко Ю.И., Рудаков В.И. Формирование сквозных отверстий в кремниевой подложке. Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28, вып. 24. – С. 75 – 79.

# УДК 621.794.4



# ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

### ОДИНОКОВ С.Б., САГАТЕЛЯН Г.Р., БУГОРКОВ К.Н., ПОПОВ В.В.

### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: h\_sagatelyan@mail.ru

**Аннотация:** Теоретически и экспериментально определены лимитирующие стадии плазмохимического травления (ПХТ) при работе на установке, использующей индуктивно-связанную плазму. Обнаружено взаимодействие хромовой маски с химически активными частицами элегаза. Даны рекомендации по подбору оптимальных режимов травления.

**Ключевые слова:** плазмохимическое травление, оптическое стекло, диодная система, хромовая маска.

# THE POSSIBILITIES OF THE PLASMA ETCHING OF OPTICAL GLASS TO CREATE A FUNCTIONAL MICRO-RELIEF

### S.B. ODINOKOV, H.R. SAGATELYAN, K.N. BUGORKOV, V.V. POPOV

### Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

### E-mail: h\_sagatelyan@mail.ru

**Abstract:** The limiting stages of plasma chemical etching (PCE) were determined theo-retically and experimentally applicable to work on a device using inductively coupled plasma. The interaction of the chrome mask with chemically active particles of SF6 has been found. Recommendations on the selection of optimal modes of etching are given.

Keywords: plasma chemical etching, optical glass, diode system, chrome mask.

### ВВЕДЕНИЕ

В оптической промышленности для получения необходимого рельефа при изготовлении дифракционных или голограммных оптических элементов (ДОЭ и ГОЭ) успешно используют методы плазмохимического травления (ПХТ) [1]. Для таких деталей глубины рельефа составляют порядка 1...2 мкм [2, 3]. В качестве материала маски, через которую при реализации ПХТ происходит формирование микрорельефа, рекомендуют применять хром [4], являющийся химически стойким металлом.

Известно [5], что в процессе ПХТ одновременно с удалением обрабатываемого материала (стекла) происходит и химическое разрушение хромовой маски, что влияет на точность воспроизведения требуемого узора функциональной поверхности ГОЭ [6]. Однако особенности химического взаимодействия активных газов, применяемых при ПХТ, с хромовой маской до настоящего времени не исследовались.

Предварительные эксперименты по ПХТ оптического стекла [7], проведенные на установке RIE-300 (рис.1) производства фирмы Torr International, Inc, конструкция которой основана на использовании индуктивно-связанной плазмы, показали перспективность плазменного метода травления и необходимость дальнейшего совершенствования технологического процесса ПХТ.



Рисунок 1. Установка плазмохимического травления RIE-300: а) – рабочая камера; б) – внешний вид

Целью данной работы являлось определение путей совершенствования технологического процесса ПХТ оптического стекла с использованием индуктивно-связанной плазмы.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИМИТИРУЮЩИХ СТАДИЙ ПХТ

ПХТ представляет собой некую последовательность стадий протекания химических реакции [8], где скорость данного процесса определяется лимитирующей стадией. Основные стадии протекания химических реакций:

 переход молекул рабочего газа в энергетические и химически активные частицы (ХАЧ);

- доставка ХАЧ к поверхности изделия;

 – взаимодействие энергетических и ХАЧ с изделием;

 отвод продуктов взаимодействия от поверхности обрабатываемого изделия.

Переход молекул рабочего газа в газовом разряде (как и в работе [7], рассматривается элегаз SF<sub>6</sub>) в энергетические и ХАЧ происходит за счёт протекания ряда процессов в перменном электромагнитном поле. На основе применения формул, приведённых в работе [9] оказывается, что мы имеем плазму высокого давления и низкой плотности. В данном случае лимитирующим фактором является минимальная мощность, подаваемая на индуктор, для образования индуктивно связанной плазмы.

Доставка ХАЧ к поверхности обрабатываемого изделия происходит в соответствии с конкретным механизмом доставки ХАЧ, который определяется соотношением радиусом камеры R (рис. 1, *a*) и длиной  $\lambda$  свободного пробега молекул [9]. Для применяемого диапазона давлений оказывается, что  $\lambda = 0,04 - 0,4$  мм. В связи с малой длиной свободного пробега молекул доставка ХАЧ к обрабатываемому изделию происходит по механизму диффузии. Лимитирующим параметром здесь является создание около обрабатываемого изделия концентрации ХАЧ достаточной для получения требуемой скорости протекания плазмохимического процесса.

Взаимодействие энергетических и ХАЧ с поверхностью кварцевого стекла можно записать в виде: 4*F*(*газ*) + *SiO*<sub>2</sub>(*mв*) → *SiF*<sub>4</sub>(*газ*) + *O*<sub>2</sub>(*газ*) (1) Лимитирующим здесь является процесс полимеризации фторсодержащего газа в результате газотранспортной реакции на обрабатываемом изделии, которая протекает под действием ультрафиолетового излучения и прочих воздействий, характерных для плазмы.

Образующийся полимер представляет собой высаживаемую на обрабатываемом изделии плёнку, препятствующую протеканию реакции (1). Плёнка полимера, высаживаемого из элегаза, имеет рыхлую структуру и может быть разрушена кислородом, присутствующим во вводимой в рабочую камеру газовой смеси.

Отвод продуктов взаимодействия от поверхности обрабатываемого изделия, аналогично доставки ХАЧ к обрабатываемому изделию, происходит по механизму диффузии.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛИМИТИРУЮЩИХ СТАДИЙ ПХТ

Для ПХТ использовались образцы, изготовленные из фотошаблонов интегральных микросхем с нанесенной хромовой маской. Операция ПХТ представляла собой последовательность из девяти переходов – пять переходов кислородной очистки и четыре перехода собственно ПХТ - продолжительностью 10 мин каждый.

Оценивали влияние на процесс ПХТ двух факторов: 1) Расположение изделия по отношению к индуктору и травящему газу; 2) Расход травящего газа. Результаты профилографических исследований представлены в табл. 1.

Микрофотографии после ПХТ, ультразвуковой очистки (УЗО) и кислотного травления (КТ) приведены в Табл. 2. УЗО производили с применением водных растворов составов Allstrip и Nanocleantop, рекомендуемых для оптических деталей. КТ заключалось в обработке образцов в кипящей серной кислоте 30% - ной концентрации в течение 30 мин.

### АНАЛИЗ

Микрофотографии, представленные в табл. 2, указывают на процесс обратного переосаждения веществ, образующихся в результате протекания химических реакций. Обратное

№ эксперимента	Расположение поверхности	Подача газа	Измеренная глубина рельефа <i>Н</i> , мкм
1	вверх	обильная	$3,65 \pm 0,04$
2	вверх	уменьшенная	$1,61 \pm 0,03$
3	ВНИЗ	обильная	$3,84 \pm 0,06$
4	ВНИЗ	уменьшенная	$1,89 \pm 0,03$

Таблица 1. Результаты измерений глубины рельефа при варьировании расположением подвергаемой ПХТ поверхности и объёмом подаваемого газа

переосаждение обрабатываемого материала (прозрачные «капли») связано с трудностью удаления продуктов химических реакций от обрабатываемого и изделия. На микрофотографиях можно наблюдать участки с зеленым и коричневым налетом – это результат обратного осаждения хрома – материала маски. Известно [10], что результат взаимодействия хром со фтором – это соединения фторид хрома (III) (трифторид хрома) CrF<sub>3</sub> и CrF<sub>4</sub>. CrF<sub>3</sub> внешне представляет собой зеленое твёрдое кристаллическое вещество. CrF<sub>4</sub> внешне представляет собой соединение коричневого цвета.

Из сопоставления результатов, представленных в табл. 1 и 2, можно заключить, что повышение обильнаости подачи химически активных газов приводит как к повышению производительности процесса ПХТ, так, одновременно, и к интенсификации процесса химического разрушения защитной маски из хрома.

### выводы

Можно заключить, что помимо обрабатываемого материала ХАЧ взаимодействуют с материалом маски – хромом, что говорит о необходимости замены материала маски. Материал – заменитель должен иметь большую химической стойкостью к фтору.

Таблица 2. Микрофотографии поверхностей образцов при расположении подвергаемых ПХТ поверхностей «Вниз»

Режимы ПХТ необходимо подбирать так, чтобы обеспечивался оптимальный баланс между максимальной скоростью ПХТ, получаемой увеличением расхода активного газа и приемлемым качеством травленной поверхности, снижающимся при затруднённости отвода продуктов реакций.

### Список литературы:

1. Одиноков С. Б., Сагателян Г. Р., Ковалев М. С. Расчет, конструирование и изготовление дифракционных и голограммных оптических элементов: Учебное пособие. - М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. – 125 с.

2. Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р. Экспериментальные исследования плазмохимического травления стекла. - VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. 2017. С. 152-153.

3. Design and experiments of combined diffractive optical element for virtual displays and indicators / Odinokov S.B., Ruchkina M.A., Sagatelyan G.R., Solomashenko A.B., Zherdev A.Y. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 4, Advances and Modern Trends. 2015. C. 95080R.

4. Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов / С.Б. Одиноков, Г.Р. Сагателян, А.С. Гончаров, М.С. Ковалев, А.Б. Соломашенко и Н.М. Вереникина – Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5. С. 27 – 35.

5. Получение голограммных и дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления в стекле / Сагателян Г.Р., Одиноков С.Б., Кузнецов А.С., Ковалев М.С., Сафт М.В., Попов В.В. - Контенант. 2016. Т. 15. № 3. С. 8-12.

6. Исследование свойств восстановленного луча с объёмных голограммных оптических элементов, используемых в оптических приборах наблюдения / Бобринев В.И., Ковалев М.С., Одиноков С.Б., Сагателян Г.Р. - Известия высших учебных заведе-

### Таблица 2. Микрофотографии поверхностей образцов при расположении подвергаемых ПХТ поверхностей «Вниз»



ний. Физика. 2015. Т. 58. № 10. С. 87-94.

7. Бугорков К.Н., Сагателян Г.Р. Плазмохимическое травление стекла с применением высокочастотной диодной системы. – Естественные и технические науки. - № 8, 2017. – С. 87 - 91.

8. Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях [Электронный курс]: учебное пособие / В.А. Галперин, Е.В. Данилкин, А.И. Мочалов; под ред. С.П. Тимошенкова. – 3-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 283 с.

 Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of plasma discharges and materials processing. -Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 2005. - 757 p.

10. *Herbstein F.H., Kapon M., Reisner G.M.* Crystal structures of chromium (III) fluoride trihydrate. Structural chemistry of hydrated transition metal fluorides. Thermal decomposition of chromium (III) fluoride nonhydrate. - Zeitschrift für Kristallographie 1985, volume 171, pp. 209.

# ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ И ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ГОЛОГРАММНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ОДИНОКОВ С.Б., КОВАЛЕВ М.С., СОЛОМАШЕНКО А.Б., ГРАД Я.А., НИКОЛАЕВ В.В., СОКОЛОВ Г.В.\*, ШВЕЦОВ И.А.\*

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

\*ПАО Красногорский завод им. С.А. Зверева

E-mail: Art\_s87@mail.ru

**Аннотация:** В работе проведен обзор разработанных различных схем голографических прицелов, в которых реализован метод компенсации смещения углового положения прицельного знака. Наибольший интерес представляет метод построения устройств визуализации основанный на применении КСГФ; представлены две схемы реализации описанного метода и приведены результаты экспериментального моделирования этих схем.

**Ключевые слова:** оптика, голография, дифракционные оптические элементы, прицел, прицельный знак.

# OPTICAL DEVICES FOR VISUAL OBSERVATION AND TARGETING BASED ON HOLOGRAPHIC ELEMENTS

ODINOKOV S.B., KOVALEV M.S., SOLOMASHENKO A.B., GRAD YA.A., NIKOLAEV V.V., SOKOLOV G.V.\*, SHVETSOV I.A.\*

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

PJSC «Krasnogorsky plant named by S.A. Zverev», Krasnogorsk

E-mail: Art\_s87@mail.ru

**Abstract:** In the work the review of the developed various schemes of holographic sights in which the method of compensation of displacement of angular position of an aim sign is realized is carried out. The most interesting is the method of constructing visualization devices based on the use of computer-synthesized Fourier holograms; Second schemes for implementing the described method are presented and the results of experimental modeling of these schemes are presented.

Keywords: optics, holography, diffractive optical elements, sight, sighting sign.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача оптического ввода знако-символьной информации в поле зрения оператора с одновременным сохранением возможности наблюдения внешней сцены в последние годы вызывает высокий интерес разработчиков. Особое место занимают оптические приборы визуального наблюдения и целеуказания, в которых для обеспечения высокой точности наведения специальный символ или прицельный знак, введённый в поле зрения оператора, должна сохранять свою привязку к объекту прицеливания независимо от внешних условий, а также от положения глаз наблюдателя.

Оптические приборы визуального наблюдения, основанные на использовании голограммных и дифракционных оптических элементов (ГОЭ-ДОЭ), позволяют эффективно решить поставленную задачу. К наиболее известным представителям таких приборов можно отнести голографические прицелы (ГП). ГП обеспечивает процесс прицеливания в «динамике», так как глаз стрелка не надо устанавливать вплотную к прицелу, а можно смотреть через него на любом расстоянии, как в «окно», и видеть прицельный знак в бесконечности, что для динамической стрельбы очень важно. Таким образом, реализуется значительное преимущество ГП - легкость процесса прицеливания.

Существенным недостатком этих прицелов является изменение положения изображения прицельного знака вследствие изменения длины волны восстанавливающего излучения полупроводникового лазера, а также наличие параллаксного эффекта, что приводит к смещению знака относительно точки прицеливания при незначительном смещении глаза оператора. Параллакс прицельного знака можно разделить на две составляющие: аберрационный и геометрический. Аберрационный параллакс обусловлен собственными аберрациями голограммы, возникающими при изменении параметров схемы восстановления по сравнению со схемой получения. и может быть минимизирован за счет согласования схем получения и восстановления ГОЭ. Геометрический параллакс (или параллакс наблюдения) - это несовпадение плоскости, в которой располагается цель, и плоскости, в которой восстанавливается прицельный знак, вызванное изменением угла дифракции на ГОЭ. Это приводит к необходимости использования многокомпонентных оптических схем прицелов, обеспечивающих компенсацию углового ухода прицельного знака, расположенными на различных расстояниях от изображающей голограммы.

## СХЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ

Для решения этой проблемы предлагается использовать ГП, на основе двух ГОЭ-ДОЭ, как показано на рисунке 1. Схема ГП содержит полупроводниковый источник излучения, голограмму с изображением прицельной марки, а также пропускающую дифракционную решетку (ПДР) для компенсации углового смещения наблюдаемого изображения прицельной марки из-за температурного ухода длины волны излучения источника.

При параллельном расположении ГОЭ и ПДР угол дифракции излучения на ГОЭ не зависит от длины волны излучения при равенстве частот  $V_{KДP}$  и  $v_{TOP}$ . При этом угол падения излучения на компенсационную решетку должен быть равен углу дифракции излучения на ГОЭ.

Для данного расположения дифракционной решётки и голограммы система уравнений запишется следующим образом:

$$\sin(\theta_{KAP}) + \sin(\phi(\lambda)) = \lambda \times \nu_{KAP}, \qquad (1)$$
$$\sin(\phi(\lambda)) + \sin(\theta_{\Gamma O \ni}) = \lambda \times \nu_{\Gamma O \ni}$$

Из (1) видно, что

$$\sin(\theta_{KAP}) - \sin(\theta_{\Gamma O \Im}) = \lambda \times \nu_{KAP} - \lambda \times \nu_{\Gamma O \Im}$$
(2)

Из (2) следует, что угол падения излучения на ПДР ( $\theta_{IO3}$ ) равен углу дифракции излучения на ГОЭ ( $\theta_{IO3}$ ) при условии, что  $v_{KДP} = v_{IO3}$ . Очевидно, что угол  $\theta_{IO3}$  не зависит от изменения длины волны – данное условие обусловлено тем, что угловая дисперсия ПДР компенсируется с угловой дисперсией ГОЭ.

Или с другой стороны, если продифференцировать второе уравнение выражения (1) по λ,





Рисунок 1. Схема с ПДР и ГОЭ, расположенные параллельно друг другу и восстановленное изображение прицельного знака

и с учётом первого уравнения можно получить следующую зависимость угловой дисперсии для ГОЭ

$$\frac{d\theta_{\Gamma O \ni}}{d\lambda} = \frac{\nu_{\Gamma O \ni} - \nu_{K A P}}{\cos(\theta_{\Gamma O \ni})}$$
(3)

Из выражения (3) следует достаточное условие компенсации дрейфа длины волны:  $v_{_{K\!M\!P}} = v_{_{I\!O\!O}}$ .

Данная схема позволяет полностью компенсировать уход длины волны излучения при условии, если ГОЭ представляет собой ПДР одной пространственной частоты. Однако в общем случае ГОЭ является голограммой с изменяющейся несущей частотой, которая модулирует дифракционную картину от транспаранта, зарегистрированного на ГОЭ. В этом случае наилучшим вариантом представляется компенсация с использованием компенсационной дифракционной решетки с частотой, равной средней несущей частоте ГОЭ. Еще одним вариантом может являться изменение схемы получения ГОЭ так, чтобы несущая частота оставалась постоянной (например, получение ГОЭ по схеме Фурье с плоской волной в опорной ветви). При этом необходимо учитывать, что при восстановлении в этом случае требуется использовать ту же длину волны, что и при получении.

При изменении длины волны восстанавливающего излучения (как следствия изменения температуры окружающей среды) появляется рассогласование угла дифракции на ГОЭ для центральной и крайних зон, а прицельный знак восстанавливается с некоторым смещением относительно истинного положения. При этом необходимо отметить, что согласно экспериментальным данным смещения центральной точки знака с оптической оси нет, а максимальное значение параллакса наблюдения не превышает 40 угл. сек. Таким образом, можно утверждать, что для центральной точки прицельного знака выполняется условие термокомпенсации.

В дальнейшем для решения этой задачи предлагается максимально упростить схему прицела, избавившись от сложных компенсационных элементов, объективов, внеосевых отражателей и т.п. Таким образом, была разработана схема голографического прицела, состоящая из двух пропускающих ГОЭ, один из которых формирует в бесконечности мнимое изображение прицельного знака, а второй преобразует волновой фронт восстанавливающего излучения в плоский и выполняет задачу термокомпенсации углового ухода прицельного знака, совмещая в себе функции коллимационного объектива и компенсационной дифракционной решетки, как показано на рисунке 2.



Рисунок 2. Принцип работы безлинзового ГП

В предложенном прицеле, как показано на рисунке 2, используются полупроводниковый лазерный диод 1, находящийся в «фокальной плоскости» компенсационного голограммного оптического элемента ГОЭ-ТК 2, на выходе которого формируются параллельные пучки излучения. Далее излучение падает на голограммный оптический элемент 3, дифрагирует на его периодической структуре, попадает в глаз стрелка и формирует в пространстве прицеливания видимое мнимое изображение прицельного знака 4.

При изменении длины волны восстанавливающего излучения (как следствия изменения температуры окружающей среды) появляется рассогласование угла дифракции на ГОЭ для центральной и крайних зон, а прицельный знак восстанавливается с некоторым смещением относительно истинного положения. При этом необходимо отметить, что смещения центральной точки прицельного знака с оптической оси практически нет, а максимальное значение параллакса наблюдения не превышает 3 угл. мин.

Альтернативным подходом к решению задачи термокомпенсации смещения углового положения прицельного знака является применение компьютерно-синтезированных голограмм Фурье (КСГФ), обладающих простой оптической схемой с возможностью компактной реализации.

Наиболее распространённые знаки, использующиеся в приборах визуального наблюдения и целеуказания, представляют собой центрально-симметричную фигуру (круг, крест, ромб и т.д.) с центральной прицельной точкой. Подобный знак может быть реализован путём восстановления голограммы Фурье. Для создания голограммы Фурье может быть использован метод компьютерного синтеза и проекционной записи амплитудных голограмм Фурье. В соответствии с этим методом, структура голограммы рассчитывается численно на компьютере, представляется в виде растрового изображения, выводится на экран пространственно-временного модулятора света и проецируется на голографический носитель с необходимым уменьшением. Применение фазового кодирования записываемого объекта при синтезе позволяет достичь порядка 40% дифракционной эффективности КСГФ, реализованных описанным методом.

Для восстановления изображения объекта, закодированного на КСГФ, необходима схема на основе сферической линзы, участвующей в качестве фурье-объектива. При освещении голограммы плоским когерентным световым пучком, изображение записанного объекта и его сопряженное восстановятся в задней фокальной плоскости линзы. Аналогичным образом хрусталик глаза оператора может быть использован в качестве Фурье-объектива для получения изображения знака на поверхности сетчатки. Поскольку восстановленное голограммой Фурье изображение сфокусировано на бесконечность, то при хорошей коллимации считывающего пучка это обеспечит отсутствие параллаксного эффекта при движении глаза оператора. Кроме того, незначительное изменение длины волны считывающего пучка скажется лишь на незначительном изменении масштаба восстановленного изображения, при этом центральная точка, сформированная нулевым порядком, останется на том же месте.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рисунке 3 представлена оптическая схема устройства визуального наблюдения и целеуказания, позволяющая наблюдать восстановленное изображение прицельного знака в наложении на окружающую сцену. Ключевым элементом этой схемы является полупрозрачное зеркало, которое отражает лучи света, дифрагировавшие на структуре КСГФ в сторону глаза оператора, не перекрывая при этом обзор внешней сцены.



Рисунок 3. а) – оптическая схема устройства визуализации на основе КСГФ и полупрозрачного; б) – схема устройства визуализации на основе световода, ДОЭ и КСГФ

Применение оптических волноводов в сочетании с ДОЭ позволяет создать компактную схему прибора целеуказания [1-3]. Лазерный модуль или светодиод формирует световой пучок. Сколлимированный объективом пучок лучей дифрагирует на структуре КСГФ и вводится в оптический волновод с помощью ДОЭ, представляющий собой дифракционную решётку. Частота штрихов ДОЭ подбирается таким образом, чтобы на используемой длине волны излучение дифрагировало в волновод под углом полного внутреннего отражения. Второй ДОЭ, с частотой линий равной частоте первого, используется для вывода излучения (а соответственно и изображения осесимметричного прицельного знака) в направлении глаза оператора. Равенство пространственных частот ДОЭ является

условием термокомпенсации смещения углового положения прицельного знака.

Схемы с рисунка 3 были исследованы экспериментально. Качество восстановленных изображений, наблюдаемых в экспериментах, позволяет сделать вывод о высокой эффективности предложенных схем.

Волноводная схема лежит также в основе устройства Luminit [4]. Эта система построена на основе OLED-микродисплея, формирующего необходимую знако-символьную информацию, в том числе и прицельные знаки разной формы, в отличие от традиционных ГП. Прицел имеет возможность выводить полноцветное изображение с разрешением SXGA и яркостью, отрегулированной по дневному и ночному освещению.



Рисунок 4. Результаты численного (слева) и экспериментального исследования схем реализации устройств отображения дополненной реальности



Рисунок 5. Прицел Luminit на основе волновода

Кроме того, Luminit разработал нашлемную навигационную систему на основе волноводов и ГОЭ, которая отслеживает положение головы пилота, чтобы обеспечить повышение точности прицеливания. Luminit ведет разработку полноцветного устройства дополненной реальности на основе волноводной подложки, который улучшит подготовку пехотинцев. Это устройство будет выглядеть как баллистические очки и удобно работать на голове, формируя изображение, передавая его через волновод и направляя в поле зрения пользователя.

Аналогичным устройством отображения информации и целеуказания является монохромный дисплей компании BAE System (Великобритания), описанный в [5]. Данная схема построена на основе двух склеенных световодов, внутри которых излучение распространяется под углом ПВО. Рабочее угловое поле такой системы составляет 35×25 градусов при размере выходного зрачка 18 мм. В системах компании Lumus (США) осуществлена реализация на основе склеенной стопки зеркал с различным коэффициентом отражения. Данная стопка имеет вид плоскопараллельной пластины, внутри которой излучение распространяется под действием ПВО, а попадая на частично отражающее зеркало, выводится пользователю. При этом зеркала имеют хорошее пропускание на просвет, а такие системы могут составить конкуренцию световодам с ГОЭ-ДОЭ, хотя технология их изготовления существенно сложнее.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом использования предложенных технических решений является создание голографического прицела, имеющего существенные функциональные преимущества по сравнению с имеющимися аналогами. Эти преимущества выражаются в получении двухкомпонентного схемы восстановления прицельного знака, состоящей из ГОЭ и компенсирующей пропускающей дифракционной решетки, а также обеспечении компенсации углового ухода прицельного знака. Кроме того, в работе представлен метод построения устройств визуализации основанный на применении КСГФ, представлены две схемы реализации описанного метода и приведены результаты экспериментального моделирования этих схем.

### Список литературы:

[1] Одиноков С. Б. Безлинзовый голографический прицел / М. С. Ковалев, А. Б. Соломашенко // Сборник научных трудов Научной сессии МИФИ. — 2011.

[2] *Betin A. Y.* A combination of computer-generated fourier holograms and light guide substrate with diffractive optical elements for optical display and sighting system / S. S. Dontchenko, M. S. Kovalev, A. B. Solomashenko, E. Y. Zlokazov // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, DH. — 2015. — P. 410.

[3] *Solomashenko A.B.* The optical scheme for recording of miniature light guide holographic indicator / S. B. Odinokov, V. V. Markin, A. S. Kuznetsov, E. A. Drozdova // Proc. of SPIE. — 2013. — Vol. 8776. — P. 87760Q.

[4] Luminit shaping light as needed / URL: <u>https://</u> <u>www.luminitco.com</u> (Дата обращения: 20.06.2018 г.)

[5] *Cameron A*. Optical Waveguide Technology & Its Application In Head Mounted Displays // Proceedings of SPIE. — 2012. — Vol. 8383. — 83830E.

# МОДЕЛЬ ПРИЗМЫ ПЕХАНА Пк-0 И ЕЁ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ПРОГРАММЕ ZEMAX В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

### КАЧУРИН Ю.Ю.\*, КАРАТЕЕВА А.А.\*,\*\*, СКЛЯРОВ С.Н.\*\*

\*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

\*\*ПАО Красногорский завод им. С.А. Зверева

E-mail: caich@mail.ru, anastasya.karateeva@yandex.ru, s.sklyarov@zenit-kmz.ru

**Аннотация:** Представлена модель призмы Пехана Пк-0. Исследованы факторы, влияющие на трассировку луча через не и получение параксиальных характеристик в последовательно-непоследовательном режиме в программе Zemax. Проведено сравнение остаточных аберраций рассчитанных для системы, использующей представленную модель с остаточными аберрациями эквивалентной системы.

Ключевые слова: призма Пехана Пк-0, Zemax, CAD object, Poligon object.

# SMIDT-PEHAN PRISM MODEL AND ITS USAGE FOR OPTICAL SYSTEM ANALYSIS AT THE MIXED SEQUENTIAL/NON-SEQUENTIAL MODE IN ZEMAX

YU.YU. KACHURIN\*, A.A. KARATEEVA\*,\*\*, S.N.SKLYAROV\*\*

\*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

\*\*PJSC «Krasnogorsky plant named by S.A. Zverev», Krasnogorsk

E-mail: caich@mail.ru, anastasya.karateeva@yandex.ru, s.sklyarov@zenit-kmz.ru

**Abstract:** The model of Schmidt–Pechan prism is presented. Factors influencing to the through-prism ray tracing have been investigated and the paraxial data in the mixed sequentially /non-sequential mode have been obtained in the Zemax. The residual aberrations calculated for the system using the presented model and for the equivalent system were compared.

Keywords: Schmidt–Pechan prism, Zemax, CAD object, Poligon object.

### ВВЕДЕНИЕ

Призмы являются неотъемлемой частью достаточно большого числа приборов и технологических установок. Они решают задачи [1] поворота оптической оси, оборачивания, уменьшения габаритов, перископичности.

Для удобства на этапах габаритного и аберрационных расчетов призмы разворачивают в эквивалентные плоскопараллельные пластинки [2-4]. Такая замена позволяет на ранних стадиях работы упростить расчеты, но она не учитывает ряд факторов: ограничения габаритов пучков (виньетирование) гранями призмы, изменение состояния поляризации и уменьшение интенсивности при отражении и др.

Проверочные расчеты требуют расчета хода лучей через реальную систему, а, следовательно, есть потребность в моделировании реальной призмы [5].

Призма Пехана состоит из 2-х призм: БУ-45 (полупентапризма) и ВкР-45 (призма Шмита с крышей), разделенные воздушным промежутком, равным 0,1 мм. Призма БУ-45 имеет две отражающие грани. Призма ВкР-45 имеет три отражающие грани, одна из которых выполнена в форме крыши.

Призма без крыши достаточно просто моделируется при помощи задания наклоненных отражающих поверхностей, трассировка луча через которые, возможна в последовательном режиме [6].

Отражающую грань, выполненную в виде крыши, отражающими поверхностями не задать, так как часть лучей сначала отражается от одной части крыши, часть сначала от другой, тем самым для двух частей пучка лучей будет различная последовательность встречи поверхностей. Следовательно, в последовательном режиме расчет хода лучей реализовать не получится. Чтобы трассировать лучи через такие компоненты в программе Zemax реализованы последовательно-непоследовательный и непоследовательный режимы. Каждый из этих режимов имеет свои достоинства и недостатки. В последовательно-непоследовательном доступны параксиальные величины, в непоследовательном режиме реализован расчет энергетических характеристик.

Последовательно-непоследовательный режим в программе Zemax [7] реализован так, что при переходе от последовательного компонента к непоследовательному передаётся матрица из направляющих косинусов лучей. Далее происходит трассировка лучей через непоследовательный элемент и передача матрицы направляющих косинусов лучей обратно в последовательную часть. Передача осуществляется во входном и выходном портах непоследовательного компонента. Положение входного порта задаётся осевым расстоянием относительно предыдущего последовательного компонента. Положение выходного порта задаётся в строке непоследовательного компонента редактора LDE заданием его смещения и поворота по координатным осям относительно входного порта.

Проблема дальнейшей трассировки лучей в последовательном режиме заключается в том, что программа Zemax не вычисляет световой диаметр выходного порта и его необходимо задать вручную. Для этого предназначена следующая после непоследовательного компонента поверхность. Ввод осевого расстояния до неё не предусмотрен, она совпадает с выходным портом и является как-бы входным «окном» в последующую последовательную часть. В ячейке Semi-Diameter этой поверхности необходимо ввести значение, большее диаметра светового пучка, выходящего из выходного порта. Световые диаметры на последующих поверхностях программа Zemax рассчитает автоматически.

Непоследовательный компонент, соответствующий призме Пехана Пк-0, в программе Zemax можно задать двумя способами:

- использовать текстовый файл с координатами вершин(\*.pob);

-использовать твердотельную модель, начерченную в CAD (\*.egs,\*.step, \*.sldprt).

### 1. СОЗДАНИЕ 3D МОДЕЛИ

Базовые размеры, определяющие геометрию отдельных призм, показаны на рис. 1. Расстояние между ними 0,1 мм

Особенностью призмы Пехана является то, что для луча, идущего через центр входной



Рисунок 1. Призма Пехана Пк-0. Базовые размеры

грани призмы БУ-45, выходящий из призмы ВкР-45 луч является продолжением входящего. Чтобы правильно сориентировать призмы был найден коэффициент пропорциональности между сдвигом призмы ВкР-45 вдоль стороны 22,5 и поперечным смещением выходящего луча, которых равен 1+1/√2 и определено точное позиционирование одной призмы относительно другой.

Определив ориентацию призм относительно друг друга, была построена 3D модель с учетом крыши (рис. 2) и определены координаты вершин. За начало координат была взята середина входной грани.



Рисунок 2. Призма Пехана. 3D вид

Для призмы БУ-45 полученные значения координат равны:

		•	
V1	7.0	6.6	0.0
V2	7.0	-6.6	0.0
V3	-7.0	-6.6	0.0
V4	-7.0	6.6	0.0
V5	7.0	-9.3099025766973	15.9099025766973
V6	7.0	-12.0536146650571	13.1661904883376
V7	-7.0	-12.0536146650571	13.1661904883376
V8	-7.0	-9.3099025766973	15.9099025766973

для призмы ВкР-45 значения координат равны:							
V9 7	7.0	-9.2824855787278	16.0239069349651				
V10 -	-7.0	-9.2824855787278	16.0239069349651				
V11 ·	-7.0	1.2698489448583	5.4715724113790				
V12	7.0	1.2698489448583	5.4715724113790				
V13	7.0	5.6407690192254	16.0239069349651				
V14 -	-7.0	5.6407690192254	16.0239069349651				
V15	0.0	13.2175144212722	16.0239069349651				
V16	0.0	6.6274169979695	0.1140043582678				

Грани призм в роb- файле можно задать либо треугольниками, либо четырехугольниками. Описание призмы БУ-45 имеет вид:

R12340
R 1 4 8 5 0
R 2 3 7 6 1
R 5 6 7 8 0
R 1 2 6 5 0
R 4 3 7 8 0
описание призмы ВкР-45 имеет вид:
R 9 10 11 12 0
R 9 10 14 13 0
R 12 13 15 16 1
R 11 14 15 16 1
T 13 14 15 0
T 11 12 16 0
Т 9 12 13 0
T 10 11 14 0
_

где R – статус четырехугольника, следующие 4 числа- номера вершин, последняя цифра – тип поверхности (0 – преломляющая поверхность, 1 – зеркальная); T – статус треугольника, следующие 3 числа- номера вершин, последняя цифра – тип поверхности (0 – преломляющая поверхность, 1 – зеркальная).

Полученный текстовый файл сохранён с расширением .pob и помещен в директорию Zemax\objects\Polygon Objects

Непоследовательный элемент в виде pobфайла задается в программе Zemax [6,7] при помощи двух редакторов: Lens Data Editor(LDE) и Non-Sequential Component Editor (NSC).

В редактор LDE была добавлена поверхность, в диалоговом окне свойств поверхности Surface Properties был выбран тип поверхности Surface Type: Non-Sequential Component.

После этого в редакторе непоследовательных компонентов: Non-Sequential Component Editor в диалоговом окне свойств объекта Object Properties во вкладке Туре выбран тип объекта Poly Object, в ячейке Data File – название файла.

В редакторе NSC для каждого элемента необходимо ввести его положение и наклон относительно входного порта. По умолчанию эти значения имеют нулевые значения. В нашем случае непоследовательным элементом является только призма Пехана Пк-0, поэтому совместим её входную грань с входным портом, оставив нулевые начальные значения для координат и наклона. Кроме того в редакторе непоследовательных компонентов NSC необходимо ввести марку стекла и коэффициент масштаба: маркой стекла является стекло К8, а так как модель создавалась в масштабе 1:1, то в качестве масштабного коэффициента Scale задаем 1.

Чтобы окончательно задать непоследовательный элемент в редакторе LDE необходимо задать положение выходного порта. Совместим выходной порт с выходной гранью призмы Пехана, а центр порта – с выходящим параксиальным лучом. В идеальном случае для призмы Пехана Пк-0 прохождение луча через призму не приводит к наклону выходящего луча относительно осей координат, а соответственно значения Exit Tilt X, Exit Tilt Y, Exit Tilt Z должны остаться нулевыми. Так как также не происходит поперечного смещения луча, то значения Exit Loc X, Exit Loc Y также должны остаться нулевыми. В продольном направлении луч сместится на толщину призмы, которая равна 16,029.

Чтобы можно было трассировать луч нужно еще добавить данные об апертуре, спектральном составе и угловом поле.

### 2. АНАЛИЗ МОДЕЛИ В ПРОГРАММЕ ZEMAX

Если модель призмы Пехана сделана правильно, должны выполняться следующие условия:

- выдержанно расстояние 0,1 между призмами;

 осевой параксиальный луч должен после призмы остаться осевым параксиальным;

 задний фокальный отрезок в системе объектив+призма должен равняться заднему фокальному отрезку в системе, где призма представлена в виде двух эквивалентных плоскопараллельных пластин (эквивалентная оптическая система);

 величина изображения должна равняться величине изображения в эквивалентной оптической системе.

Первые два условия можно проверить, осуществив трассировку осевого параксиального луча. Начальные условия (Ray Trace Settings) и текстовое окно с результатами трассировки луча представлены на рис. 3.

Ray Trace     Lodate Settings Print Window					-OX
Ray Trace Data					
Units : Hillimeters Wavelength : 0.550000 µm Coordinates : Local Direction cosines are after refraction or M Angles are in degrees. Normalized X Field Coord (Hx) : 0.0000 Normalized X Field Coord (Hy) : 0.0000 Normalized X Pupil Coord (Px) : 0.0000 Normalized X Pupil Coord (Py) : 0.0000 Real Ray Trace Data:	reflection from the surface or ob 900000 900000 900000 900000	ject.	Hx     0       Hy:     0       Field:     Arbitrary       Wavelength:     1       OK     Cancel	PX: 0 Py: 0 J Global Coordinates J Type: Dir Cosines Save Load Reset Help	
Surf         X-coordinate         Y-coordinate           0BJ         Infinity         Infinity           1         0.00000000000000000000000000000000000	Z-coordinate         X-cosim           Infinity         0.00000000000000000000000000000000000	e V-cosine 0 0.0000000000 1 0 0.000000000 1 0 0.000000000 1 0 0.000000000 1 0 0.000000000 0 0 0.7071067812 0 0 0.7071067812 -0 0 0.7071067812 -0	Z-cosine 1.0000000000 1.0000000000 1.0000000000	Path length Comment 0.0000000000E+000 0.0000000000E+001 0.00000000000000E+000 0.0000000000000000000000 0.00000000	ct 1 (refract) ct 1 (reflect) ct 1 (reflect) ct 1 (refract) ct 1 (refract) ct 1 (reflect) ct 1 (reflect) ct 1 (terminated)

Рисунок 3. Текстовое окно ReyTrace

Анализ текстового окна с результатами трассировки показал [8], что луч дошел только до поверхности 7 непоследовательного элемента и не нашел следующую. Поверхность 7 является одной из граней образующих крышу, более детальное исследование показало, что реально луч попал на ребро крыши. Ребро крыши принадлежит обеим граням образующим крышу, поэтому программа Zemax испытала трудности в определении положения нормали в этом месте. Руководство по эксплуатации программы Zemax [7] в этом случае рекомендует сместить призму с оптической оси на небольшое расстояние.

Смещение призмы задается в редакторе непоследовательных компонентов NCS. Так как ребро крыши лежит в плоскости Y и Z смещение призмы по этим координатам результата не даст. Смещать надо только вдоль оси X (X Position). Зададим это значение равным 0,00001. В результате такого смещения призмы параксиальный осевой луч сместится в поперечном направлении на двойную величину. Чтобы параксиальный луч стал снова параксиальным надо сместить систему координат вдоль оси X, за счет смещения центра выходного порта (рис. 4).

Результаты повторной трассировки осевого параксиального луча представлены на рис. 5. Анализ представленных данных показал, что параксиальный осевой луч вышел из призмы, имея поперечные смещения, равные Δx = 6,2209·10<sup>-13</sup> и Δy = 8,3384·10<sup>-14</sup>.

Эти смещения ничтожны и находятся на пределе точности вычислительных операций. Их можно не учитывать. Направляющие косинусы по осям X и Y равны нулю, направляющий косинус по оси Z равен 1, следовательно, осевой луч остался осевым.

Значение в седьмой строчке столбца Path length (рис. 5) соответствует осевому расстоянию между двумя призмами и равняется 1,00·10<sup>-1</sup>. Воздушный промежуток соответствует технической документации на призму Пехана. Таким образом, представленная модель призмы соответствие первым двум пунктам требований.

(6) Lo	Al Lens Data Editor								
Edit	Edit Solves View Help								
	Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Exit Loc X	Exit Loc Y	Exit Loc Z 🗖
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0.00000000	0.00000000			
STO	Standard	Infinity	10.00000000		4.00000000 U	0.00000000			
2	Non-Seque	Infinity	-		4.00000000	0.00000000	2.0000E-005	0.00000000	16.02900000
3	Standard	Infinity	10.00000000		4.50000000 U	0.00000000			
IMA	Standard	Infinity	-		4.00000000	0.00000000			~
() N Edit	I Non-Sequential Component Editor: Component Group on Surface I Component Editor: Detectors Database Tools View Help								
0	oject Type	X Position	Y Position	Z Position	Tilt About X	Tilt About Y	Tilt About Z	Material	Scale
1	Poly Object	1.0000E-005	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.000000000	0.00000000	К8	1.00000000

Рисунок 4. Редакторы LDE и NSC для одиночной призмы Пехана Пк-0

0 2: Ray Trace			
Rau Trace Data			
Wawelength : 0 550000 up			
Coordinates : Local			
Direction cosines are after refraction or refle	ection from the surface or object.		
Angles are in degrees.			
Normalized X Field Coord (Hy) · 8 888888888	88		
Normalized Y Field Coord (Hy) : 0.00000000	99		
Normalized X Pupil Coord (Px) : 0.000000000	00		
Normalized Y Pupil Coord (Py) : 0.000000000	00		
Real Raw Trace Data:			
neur nay made bacar			
Surf X-coordinate Y-coordinate	Z-coordinate X-cosine Y-cosine	Z-cosine Angle in	Path length Comment
OBJ Infinity Infinity	Infinity 0.000000000 0.000000000	1.000000000 -	
1 0.0000000000±+000 0.000000000±+000 0.0 2 0.000000000±+000 0.0000000000±+000 0.0	8888888886F+888 8 8888888888 8 888888888		0.000000000000000000000000000000000000
0.000000000E+000 0.000000000E+000 0.0	000000000E+000 0.000000000 0.000000000	1.000000000 0.00000000	2.0000000000E-006 NSC Object 1 (refract)
0.000000000E+000 0.000000000E+000 6.6	60000000E+000 0.000000000 -1.000000000	0.000000000 45.00000000	6.600000000E+000 NSC Object 1 (reflect)
0.000000000E+000 -9.3338095117E+000 6.6	600000000E+000 0.000000000 0.7071067812	0.7071067812 22.500000000	9.3338095117E+000 NSC Object 1 (reflect)
0.000000000000000000000000000000000000	1266904756E+001 0.0000000000 0.7071067812		6.600000000E+000 NSC Object 1 (refract)
0.000000000E+000 9.0097423303E-002 1.6	6023906935E+001 0.0000000000 0.7071067812	-0.7071067812 45_8888888	6.6274169988F+888 NSC Object 1 (refract)
0.000000000E+000 9.3725753484E+000 6.7	7414290099E+000 0.9238795325 -0.1464466094	-0.3535533906 49.210529059	1.3127406174E+001 NSC Object 1 (reflect)
2.000000002E-005 9.3725721781E+000 6.7	7414213562E+000 0.000000000 -1.000000000	-0.0000000000 49.210529059	2.1647844008E-005 NSC Object 1 (reflect)
2.0000000174E-005 8.8817841970E-014 6.7	7414213562E+000 0.000000000 -0.000000000	1.000000000 45.00000000	9.3725721781E+000 NSC Object 1 (reflect)
2.0000000344E-005 8.0/50/1012/E-014 1.0	3023900935E+001 0.000000000 -0.000000000	1.000000000 0.000002832	9.2824855787E+000 NSC Object 1 (refract)
2 0000000333E=005 8 6753000337E=013 1 6	4029000000F+001 0 000000000 -0 000000000		E AD2AKEA2hDE_AA2 NSC Abiect /evit nowt)
2.0000000344E-005 8.0754999337E-014 1.0 3 3.4399515707E-013 8.6754999337E-014 0.0	682988888888888888888888888888888888888		5.0930650349E-003 NSC Object (exit port) 9.2623188433E+001

Рисунок 5. Текстовое окно ReyTrace

Дополнительно можно сравнить развертки составляющих призму Пехана призм в плоскопараллельные пластины. Толщины были получены на основе САD модели, за счет суммирования отрезков хода луча внутри каждой из составляющих призм и данных на основе трассировки осевого параксиального луча. Эти значения представлены в таблице 1. Значения совпадают.

Таблица 1. Толщины эквивалентных плоскопараллельных пластинок по данным CAD программы Zemax

	CAD	Zemax
ВкР-45	38,40990	38,40990
БУ-45	22,53381	22,53381

Вид окна с моделью призмы и ходом лучей в ортогональных плоскостях показан на рис. 6.

В таблице 2 приведены сравнительные значения поперечного смещения параксиального осевого луча, осевого расстояния между призмами и направляющего косинуса луча с осью Х в зависимости от точности используемых значений координат вершин. Из этих таблиц видно, что при точности значений меньшей, чем 10 знаков после запятой начинают сказываться ошибки геометрии призмы, приводящие к отклонению её линейных размеров и наклону выходящего осевого луча.

Чтобы проверить остальные два условия, необходимо добавить объектив.

Система объектив+призма представлена на рис. 7. Предмет находится в бесконечности, угловое поле 2ω=6°.

Из рис. 7 видно, что положение плоскости Гаусса относительно последней поверхности равно s'=3,568826138, а величина параксиального изображения, выдаваемая в окне Prescription равна y'=2,619494. Эти значения получены при условии виньетирования, введенного для исключения лучей нижней части наклонного пучка, не испытывающих полного внутреннего отражения в призме БР-45. Коэффициенты виньетирования равны: VDX=0,00000, VDY=0,19708, VCX=0,02041,



Рисунок 6. Ход осевого луча

Таблица 2.

Значения поперечного смещения и наклона луча после прохождения призмы и расстояния между составляющими призмами в зависимости от точности задания координат вершин призм

Количество	Поперечные смещения луча		Осевое	Направляющий
знаков			расстояние	косинус луча
после запятой	$\Delta x$	$\Delta y$	между призмами	с осью Х
13	6,2209·10 <sup>-13</sup>	8,3384·10 <sup>-14</sup>	0,1000000000	0,0000000000
12	- 4,4980·10 <sup>-12</sup>	- 5,1813·10 <sup>-14</sup>	0,1000000000	0,0000000000
11	1,9934·10 <sup>-11</sup>	2,3843·10 <sup>-11</sup>	0,1000000000	0,0000000000
10	$1,3665 \cdot 10^{-10}$	$5,1652 \cdot 10^{-10}$	0,1000000004	0,0000000000
9	1,8935·10 <sup>-9</sup>	1,9186·10 <sup>-9</sup>	0,09999999832	0,0000000001
8	-4,5486·10 <sup>-8</sup>	3,8274·10 <sup>-8</sup>	0,09999995590	0,000000020

∰l Le	All Lens Data Editor								
Edit	Solves View Hel	5							
:	Surf:Type	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Exit Loc X	Exit Loc Y	Exit Loc Z
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		Infinity	0.00000000			
1	Standard	Infinity	10.0000000		4.00000000	0.00000000			
*	Standard	34.91000000	0.75000000	BF12	4.00000000 U	0.00000000			
3	Standard	13.15200000	2.25000000	K8	3.986198175	0.00000000			
4	Standard	-48.7500000	5.00000000		4.000432459	0.00000000			
5	Non-Seque	Infinity	-		3.857479009	0.00000000	2.0000E-005	0.00000000	16.02900000
6	Standard	Infinity	3.568826138	1	5.00000000 U	0.00000000			
IMA	Standard	Infinity	-		2.649271363	0.00000000			

Рисунок 7. Редактор LDE для системы объектив+призма

(6) L	ens Data Editor						1: Prescription Data	
Edit	Solves View Hel	p					Update Settings Print Window	
	Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Image Space NA	: 0.07983871
OB.	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	Object Space NA	: 4e-010
1	Standard		Infinitu	10.0000000		4.000000000	Paraxial Image Height	: 4 2.617381
	Standard		35.01888888	8.7588888888	RE12	4.00000000 II	Paraxial Magnification	: 0
	Standard		10 1000000	2.2588888888	81 12	9.086409596	Entrance Pupil Diameter	: 8
e	Scalluaru		10.15200000	2.230000000	NO	0.900192524	Entrance Pupil Position	: 10
4	Standard		-48.7500000	5.00000000		4.000434778	Exit Pupil Diameter	: 8.136756
5	Standard		Infinity	38.40990000	K8	3.857481083	Exit Pupil Position	: -50.79479
	Standard		Infinitu	0 100000000		3 150977870	Fleld Type	: Angle in degrees
-	Scanuaru		Intinity	0.100000000		0.159077079	Maximum Kadial Field	. 0 F14071
8	Standard		Infinity	22.53381000	K8	3.157112889	Primary wavelength µm	: 0.5400/4
8	Standard		Infinity	3.573920507	M	2.748061376	Angular Magnification	• A 0094090
IMA	Standard		Infinity	-		2.649271424	Higular Naghification	, 0.9631926

Рисунок 8. Редактор LDE для системы объектив+развертка призмы

VCY=0,19710. Чтобы проверить эти результаты, призму Пехана представим в виде развертки в плоскопараллельные пластины (рис. 8).

Из рис.8 видно, что положение плоскости Гаусса относительно последней поверхности равно s'=3,573920507, а высота изображения у'=2,617301.

Значения совпали с высокой степенью точности:

∆s'= 0,005094 (0,14%)

Δy'= - 0,002193 (0,08%)

Вид окна с моделью призмы и ходом лучей в ортогональных плоскостях показан на рис. 9.

# 3. АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ АБЕРРАЦИЙ

Для оценки качества получающегося изображения нами проведен анализ остаточных аберраций системы объектив+призма и эквивалентной системы, которые приведены в Теблице 3.

Значения остаточных аберраций незначительно отличаются только для меридиональной комы. Различие в знаках в поперечных аберрациях обусловлено тем, что эквивалентная система не учитывает оборачивание верх-вниз, происходящее в призме Пехана Пк-0



Рисунок 9. Ход наклонного луча

### Таблица 3.

Значения остаточных аберраций для оптической системы с интегрированной моделью призмы и для аналогичной системы с эквивалентной плоскопараллельной системы

Аберрация	Модель призмы	Эквивалентная система
Продольная сферическая аберрация для края зрачка	0,06766	0,06766
Поперечная сферическая аберрация для края зрачка	-0,005407	0,005407
Хроматизм положения	0,18035	0,18035
Хроматизм увеличения	-0,0086362	0,0086362
Дисторсия	-0,069018%	0,069018%
Астигматизм	0,05989107	0,05989106
Меридиональная кома	0,0023796756	0,0023796756

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена последовательность создания моддели призмы Пехана Пк-0 в виде роbфайла, а также способ её интегрирования в оптическую систему, заданную в программе Zemax. Проведено исследование необходимой точности координат вершин и сравнительный анализ параксиальных характеристик и остаточных аберраций системы объектив+призма. Анализ получившихся значений показал её полную тождественность эквивалентной системы.

#### Список литературы:

1. В.А. Панов, М.Я. Кругер, В.В. Кулагин Справочник конструктора оптико-механических приборов. ... Под общ. ред. В. А. Панова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1980 – 742с.

2. Б.Н. Бегунов. Теория оптических систем / Б.Н. Бегунов, Н.П. Заказнов, С.И., Кирюшин, В.И. Кузичев – М.: Машиностроение, 1988. – 453 с.

3. Запрягаева Л.А., Свешникова И.С. Расчёт и проектирование оптических систем М:Логос, 2000. – 584 с.

4. А.П. Смирнов, А.Б. Филатов Моделирование функциональных устройств оптических приборов. Часть 2 Зеркально-призменные устройства - Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2012. - 48 с.

5. Mark G. Nicholson, Kenneth E. Moore, Ingolf Hörsch Ray-Tracing CAD Objects International Optical Design Conference 2006, Vancouver Canada, 4–8 June 2006, ISBN: 1-55752-811

6. К. В. Шишаков И. Р. Загидуллин Моделирование оптических элементов в программе ZEMAX, Ижевск, издательство ИжГТУ, 2008. – 65 с.

 Руководство пользователя пакетом программ ZEMAX. Пер. с англ. А.Э. Наджип. Москва, 2010. 986 с.
 8. В.И.Заварзин, В.И.Батшев, О.В.Польщикова Компьютерные технологии и моделирование в оптотехнике: учебное пособие. – Москва: Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2017. – 37с.

9. Можаров Г.А. Теория аберраций оптических систем: Учебное пособие. – Спб.: Лань, 2013. 288 с.

10. Joseph M Geary Introduction to lens design with practical ZEMAX examples, Willmann-Bell, Richmond, Virginia USA, 2002, 455 c

#### References:

[1] Panov V.A., Kruger M.Ya., Kulagin V.V. Handbook of the optical-mechanical devices. Leningrad: Mashinostroenie, 1980, 742p.

[2] Begunov BN, Zakaznov NP, Kiryushin SI, Kuzichev VI. Optical instrumentation. Theory and design. Moscow: MIR Publishers, 1988. 453 p.

[3] Zapryagaeva L.A., Sveshnikova I.S. Analysis and design of optical systems. Moscow: Logos, 2000, 584p.

[4] Smirnov A.P., A.B. Filatov Modeling components of optical devices. Part 2 S.Peterburg: NIU IFMO, 2012, 48p.

[5] Mark G. Nicholson, Kenneth E. Moore, Ingolf Hörsch Ray-Tracing CAD Objects International Optical Design Conference 2006, Vancouver Canada, 4–8 June 2006, ISBN: 1-55752-811-X

[6] Shishakav K.V., Zagidullin I.R Optical elements modeling in the ZEMAX, Izhevsk, IzhGTU, 2008, 65p.

[7] Zemax. Optical Design Program. User's Manual. January 24, 2014, 879 p.

[8] V.I. Zavarzin, V.I. Batshev, O.V. Polshchikova Computer technologies and modeling in optic: tutorials. -Moscow: BMSTU Publishers, 2017 - 37 p.

[9] Mozharov GA. Theory of optical systems aberrations: tutorials. - St. Petersburg: Lan' Publishers, 2013. 288 p.

[10] Joseph M Geary Introduction to lens design with practical ZEMAX examples, Willmann-Bell, Richmond, Virginia USA, 2002, 455 c

# РАЗРАБОТКА ДВУХСТУПЕНЧАТОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ МИКРОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА CdSSe С ПОМОЩЬЮ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

ТАРАБРИН М.К.,<sup>1,2</sup> БУШУНОВ А.А.,<sup>1,2</sup> ЛАЗАРЕВ В.А.,<sup>1</sup>, КАРАСИК В.Е.<sup>1</sup>, КОЗЛОВСКИЙ В.И.<sup>2</sup>, СВИРИДОВ Д.И.,<sup>2</sup> КОРОСТЕЛИН Ю.В.,<sup>2</sup> ФРОЛОВ М.П.,<sup>2</sup> СКАСЫРСКИЙ Я.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана <sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук <sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

E-mail: vladimir.al.lazarev@gmail.com

Аннотация: Лазерные источники среднего ИК-диапазона находят широкое применение в различных областях науки и техники. На данный момент востребованы высокомощные твердотельные лазеры на кристаллах халькогенидов типа A2B6 (ZnSe, CdSe, CdSSe), легированных ионами переходных металлов, работающие в диапазоне от 2 до 6 мкм. Однако на КПД указанных лазерных установок серьезно влияет френелевское отражение от рабочих граней активной среды: коэффициент отражения достигает 18 % при прохождении излучения через одну грань кристалла. Для уменьшения потерь на отражение в широком (более 1 мкм) диапазоне длин волн традиционно используются многослойные тонкопленочные диэлектрические покрытия. Такие покрытия обладают низким порогом лазерного повреждения и при работе с мощным потоком излучения повреждаются, вызывая разрушение кристалла. В нашей работе представлен альтернативный способ устранения потерь на френелевское отражение: использование просветляющих микроструктур. Для этой цели разработан новый метод создания структур посредством обработки с помощью фемтосекундных лазерных импульсов образца кристалла CdSSe предварительно покрытого слоем TiO2 для получения маски, через которую впоследствии осуществляется травление в СНЗ-плазме. С помощью данного метода были созданы микроструктуры с теоретически рассчитанными параметрами, измерено их пропускание и проведено сравнение результатов с численным расчетом с помощью ПО COMSOL Multiphysics..

Ключевые слова: средний ИК-диапазон, просветление оптики, ZnSe, CdSe, CdSSe, микроструктура, фемтосекундный лазер, плазмохимическое травление, COMSOL.

# TWO-STAGE METHOD OF SURFACE MICROSTRUCTURE FABRICATION FOR CDSSE MONOCRYSTALL WITH FEMTOSECOND LASER ABLATION AND PLASMA ETCHING

M.K. TARABRIN<sup>1,2</sup>, A.A. BUSHUNOV<sup>1</sup>, V.A. LAZAREV<sup>1</sup>, V.E. KARASIK<sup>1</sup>, VLADIMIR I. KOZLOVSKIY<sup>2</sup>, D.E. SVIRIDOV<sup>2</sup>, YURIY V. KOROSTELIN<sup>2</sup>, M.P. FROLOV<sup>2</sup>, YAN K. SKASYRSKY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University <sup>2</sup>P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences <sup>3</sup>National Research Nuclear University MEPhI

E-mail: vladimir.al.lazarev@gmail.com

**Abstract:** Mid-IR laser sources have various scientific and industrial applications. At present, solid-state high power tunable lasers based on A2B6 chalcogenides operate in 2-6  $\mu$ m range are highly demanded. However, efficiency of these lasers strongly depends on the Fresnel reflection from working surfaces of a laser crystal: reflection losses from one side reach 18%. Efficient laser operation and power scaling requires a decrease of reflection losses in broad spectral range (more than 1  $\mu$ m). For this purpose, multilayer thin film antireflection coatings (TFARCs) are commonly used. However, TFARCs have a low laser-induced damage threshold, so they cannot be used in high-power laser systems. There is an alternative way to reduce Fresnel reflection using antireflection with femtosecond-pulsed laser treatment of CdSSe pre-coated with TiO2 to make mask and subsequent CH3-plasma etching through it. Fabricated microstructures transmission was measured and compared with results of finite element analysis with COMSOL Multiphysics.

**Keywords:** *MID IR, antireflection, ZnSe, CdSe, CdSSe, microstructure, femtosecond laser, plasma etching, COMSOL.* 

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время востребованы твердотельные лазеры, излучающие в диапазоне длин волн 2-6 мкм. Этот диапазон потенциально интересен для медицинских приложений, так как в этом диапазоне длин волн находятся линии поглощения колебательных переходов молекул веществ, входящих в состав тканей живых организмов. Это позволяет использовать лазеры среднего ИК-диапазона для решения задач лазерной хирургии [1], стоматологии [2] и в других областях современной медицины. Для медицинских приложений необходимо создание мощных (1-10 Вт средней мощности [3]) перестраиваемых по частоте источников когерентного излучения.

Одними из наиболее перспективных лазеров, позволяющих достигать больших выходных мощностей в требуемом диапазоне длин (2-6 мкм) при работе в различных режимах (непрерывном и импульсном) являются твердотельные лазеры на кристаллах халькогенидов A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> (ZnSe, CdSe, CdSSe), легированных ионами переходных металлов [4, 5]. Однако высокий показатель преломления халькогенидов (2,3-2,45 в диапазоне 2-6 мкм) приводит к большим потерям на отражение (до 30% на проход), что приводит к необходимости использовать просветляющие покрытия для уменьшения отражения от граней активных сред и повышения выходной мощности. Но современные просветляющие покрытия обладают малым порогом лазерного повреждения [6], что не позволяет использовать их в установках высокой мощности, где достигаются плотностях мощности более 1-2  $\frac{MBT}{cM^2}$  при непрерывном излучении. В качестве альтернативы многослойным тонкопленочным просветляющим покрытиям может быть предложен метод просветления с помощью просветляющих микроструктур, создающих градиент показателя преломления на поверхности лазерного кристалла.

Использовать градиент показателя преломления для устранения отражения от границы раздела сред предложил еще лорд Д. У. Рэлей в 1880 году [7]. Одним из способов получения градиента в сравнимом с длиной волны по толщине приповерхностном слое материала (2-3 мкм для диапазона длин волн 2-6 мкм) является создание микроскопических неровностей (порядка 2-3 мкм) на поверхности материала. Микроструктура представляет собой множество упорядоченных отверстий созданных в приповерхностном слое кристалла толщиной 2-3 мкм. Приблизительный внешний вид такой микроструктуры изображен на рисунке 1.

Просветляющие микроструктуры обладают большим порогом лазерного повреждения, чем тонкопленочные просветляющие покрытия [8]. Кроме того, они обеспечивают просветление в более широком диапазоне по сравнению с многослойными просветляющими покрытиями: 2-10 мкм в зависимости от длины волны излучения, против 1-2 мкм у большинства коммер-



Рисунок 1. Изображение микроструктуры (компьютерная графика)

чески производимых на данный момент многослойных просветляющих покрытий (фирмы ThorLabs, Edmund Optics, Алькор, СП Фотоника и др.). Поэтому при создании твердотельных лазеров среднего ИК-диапазона с высокопреломляющими активными средами разработка таких просветляющих микроструктур является актуальной и важной задачей.

### РАЗРАБОТКА МЕТОДА СОЗДАНИЯ МИКРОСТРУКТУР

Среди различных методов создания микроструктур выделяются два, позволяющих создавать структуры для диапазона 2-6 мкм интерференционной картины от нескольких лазерных источников для создания маски фоторезиста с последующим ионным травлением структуры на материале подложки [9] или непосредственным испарением материала [10]. Преимущества данного метода заключаются в возможности наносить микроструктуры на поверхности большой площади. Данный метод сложен в реализации и имеет свои ограничения. Например, наносимые структуры получаются неравномерными (из-за локализации интерференционной картины не в плоскости), что приводит к снижению их эффективности [10].

Альтернативой методу с использованием интерференционной картины является применение фемтосекундного лазера для непосредственного создания микроструктуры на поверхности лазерного кристалла. Первые шаги в этом направлении уже были предприняты и описаны в работе [11]. В данной работе предлагается развитие идеи использования фемтосекундных лазеров для создания микроструктур с помощью с помощью использования маски из TiO2, обработки на установке FemtoLab, последующего травления в СНЗ-плазме и удаления маски. К сожалению, используемая для создания микроструктур установка FemtoLab не позволяет создавать структуры с периодом менее 1,1 мкм, что ограничивает возможности создания микроструктур для требуемого диапазона длин волн. Но разрабатываемый метод легко масштабируется, что позволяет опробовать его уже с существующими возможностями. Схема процесса создания микроструктур приведена на рисунке 2.



Схема процесса создания микроструктуры с помощью плазменного травления



Рисунок 3. Трехмерная карта высот микроструктуры, полученная с помощью атомно-силового микроскопа

Образцы микроструктур создавались на одной рабочей поверхности нелегированного кристалла CdSSe, чей показатель преломления не отличается от легированных кристаллов. Затем данные микроструктуры исследовались методами атомно-силовой микроскопии. На основе полученной с атомно-силового микроскопа карты высот была построена сетка геометрии для исследования микроструктуры численным методом конечных элементов в COMSOL Multiphysics. Также данные с атомносилового микроскопа позволили с точностью ±20 нм определить период и глубину микроструктуры (период оказался равным 1,3 мкм, а глубина 1,35 мкм). Данные в виде карты высот, полученной с помощью атомно-силового микроскопа, приведены на рисунке 3.

Пропускание полученных образцов было измерено с помощью вакуумного ИК фурье-спектрометра Vertex 70v компании Bruker и проведено сравнение с результатами численного моделирования. Эти данные приведены в виде графиков на рисунке 4.

На графике приведены спектральные характеристики пропускания микроструктур для двух ортогональных друг другу поляризаций. Заметно, что пропускание в максимуме (на длине волны около 8 мкм) различается для них более чем на 3%. Можно сделать вывод о чувствительности создаваемых микроструктур к поляризации излучения. Но измерения пропускания проводились с помощью спектрометра использующего неполяризованное излучение. Поэтому, для сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными, проводился численный расчет для двух ортогональных поляризаций. Затем вычислялось среднее значение пропускания, так как неполяризованное излучение можно представить как два ортогонально поляризованных луча, каждый интенсивностью равной половине неполяризованного. Полученные данные говорят о достижении теоретического максимума пропускания для данной глубины микроструктуры в диапазоне 10-14 мкм. Однако в диапазоне 4-10 мкм возможно увеличение пропускания, для чего необходима дальнейшая оптимизация метода создания структур.



Рисунок 4.

Графики экспериментально полученной спектральной характеристики пропускания и рассчитанной численно с помощью ПO Comsol Multiphysics

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ перспектив применения современных просветляющих покрытий на основе тонких пленок диэлектриков, сделан вывод о необходимости разработки альтернативного метода просветления в связи с недостаточно высоким порогом лазерного повреждения тонких пленок диэлектриков. Предложен новый метод создания просветляющих микроструктур, который состоит из нескольких этапов. Первый этап метода заключен в создании маски из TiO2 с помощью фемтосекундного импульсного лазера. Второй этап это травление структуры в плазме CH3 через полученную маску. Созданная предлагаемым методом микроструктура обеспечивает просветление поверхности нелегированного образца монокристалла CdSSe в диапазоне 4-14 мкм, в среднем на 7 %. Максимум просветления достигается на длине волны около 8 мкм и составляет 8,5%. Данные численного расчета показывают хорошую сходимость с результатом - погрешность составляет не более 1%. Заметно, что результаты измерений говорят о более слабом снижении отражения, нежели в работе [11]. Однако численное моделирование показывает, что это связано со значительной несимметричностью созданной микроструктуры. Несимметричность можно устранить, изменив режим обработки лазером и травления. Также это позволит увеличить глубину получаемых микроструктур, что позволит еще сильнее увеличить пропускания микроструктур. В настоящее время проводится дальнейшее совершенствование двухступенчатого метода создания просветляющих микроструктур на монокристаллах в части определения оптимальных режимов травления и обработки маски для устранения несимметричности отверстий и увеличения глубины микроструктуры.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20431).

#### Список литературы:

1. Edwards G. et al. Tissue ablation by a free-electron laser tuned to the amide II band //Nature. – 1994. – T.  $371. - N_{\odot}.6496. - C.416.$ 

2. *Edwards G. S. et al.* Applications of Free Electron Lasers in the Biological and Material Sciences // Photochemistry and photobiology. – 2005. – T. 81. – №. 4. – C. 711-735.

3. Serebryakov V. A. et al. Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects //Journal of Optical Technology. – 2010. – T. 77. – №. 1. – C. 6-17.

4. *Mirov S. et al.* Frontiers of mid-infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors //Journal of Luminescence. – 2013. – T. 133. – C. 268-275.

5. *Fernandez T. T. et al.* Thermo-optical and lasing characteristics of Cr2+-doped CdSe single crystal as tunable coherent source in the mid-infrared //Optical Materials Express.  $-2017. -T.7. - N^{\circ}. 11. -C. 3815-3825.$ 

6. *Hobbs D. et al.* Laser testing of anti-reflection microstructures fabricated in ZnSe and chromium-ion doped ZnSe laser gain media //Optical Materials Express. – 2017. – T. 7. – №. 9. – C. 3377-3388.

7. Rayleigh L. On reflection of vibrations at the confines of two media between which the transition is gradual //Proceedings of the London Mathematical Society.  $-1879. - T. 1. - N^{o}. 1. - C. 51-56.$ 

8. *Hobbs D. S., MacLeod B. D.* Design, fabrication, and measured performance of anti-reflecting surface textures in infrared transmitting materials //Window and Dome Technologies and Materials IX. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – T. 5786. – C. 349-365.

9. *McDaniel S. et al.* Cr: ZnSe laser incorporating antireflection microstructures exhibiting low-loss, damageresistant lasing at near quantum limit efficiency //Optical Materials Express. – 2014. – T. 4. – №. 11. – C. 2225-2232.

10. Vartapetov S. K. et al. Study of the formation of a microrelief on ZnSe-and CdSe-crystal surfaces ablated by excimer KrF-laser radiaton //Quantum Electronics. – 2016. – T. 46. –  $N_{\rm e}$ . 10. – C. 903.

11. *Tarabrin M. K. et al.* Fabrication of Anti-reflection Microstructures on ZnSe Single Crystal by Using Femtosecond Laser Pulses //Frontiers in Optics. – Optical Society of America, 2017. – C. JTu2A. 20.



# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Cr<sup>2+</sup>:ZnSe СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД НА ОСНОВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЗЕРКАЛА С НАСЫЩАЮЩИМСЯ ПОГЛОЩЕНИЕМ

## ТОМИЛОВ С. М.,<sup>1,2</sup> ТАРАБРИН М. К.,<sup>1,2</sup> ЛАЗАРЕВ В. А.,<sup>1</sup> КАРАСИК В.Е.<sup>1</sup>

### <sup>1</sup>Научно-Образовательный центр «Фотоника и Инфракрасная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана <sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

# E-mail: sergey29395@gmail.com

Аннотация: Средний ИК-диапазон, область, включающая в себя электромагнитное излучение с длинами волн от 3 до 8 мкм, является перспективным диапазоном для создания различных лазерных систем. Лазеры среднего ИК-диапазона представляют интерес для обширного круга научных и технических задач, таких как спектроскопия высокого разрешения, оптические стандарты частоты и биомедицинские исследования.

Отдельный интерес представляют перестраиваемые лазеры среднего ИК-диапазона на основе кристаллов халькогенидов, легированных ионами переходных металлов. Благодаря широким (до 1,61 мкм по полувысоте) спектрам люминесценции данные источники излучения обладают возможностью перестройки рабочей длины волны в большом диапазоне и, в общей сложности, покрывают диапазон длин волн от 1,7 до 6,8 мкм [1]. Помимо перестройки рабочей длины волны, широкий спектр люминесценции названных активных сред позволяет реализовать лазерные системы, работающие в режиме генерации ультракоротких импульсов, представляющие интерес для медицины и спектроскопии [2].

В данной работе описан фемтосекундный лазер с кристаллом Cr2+:ZnSe в качестве активной среды на основе полупроводникового зеркала с насыщающимся поглотителем (SESAM), с максимальной выходной мощностью 520 мВт, шириной спектра 50 нм, центральной длиной волны 2,48 мкм и длительностью импульсов 392 фс.

Ключевые слова: средний ИК-диапазон, ZnSe, фемтосекундный лазер, синхронизация мод, SESAM.

# SOLID-STATE Cr<sup>2+</sup>:ZnSe MID-IR LASER MODE-LOCKED WITH SESAM

TOMILOV S. M.,<sup>1,2</sup> TARABRIN M. K.,<sup>1,2</sup> LAZAREV V. A.,<sup>1</sup> KARASIK V. E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SEC for Photonics and IR-Tecnology, Bauman Moscow State Technical University <sup>2</sup>P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences

E-mail: sergey29395@gmail.com

Keywords: mid IR, ZnSe, femtosecond laser, MODE locking, SESAM

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛАЗЕРА

В основе созданного лазера лежит четырёхзеркальный резонатор, одно из плоских зеркал которого заменено на полупроводниковое насыщающееся зеркало (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM). Схема описываемой установки представлена на рисунке 1. Для достижения режима синхронизации мод целесообразно использовать насыщающийся поглотитель с минимальной глубиной модуляции и временем релаксации. Нами использован образец с глубиной модуляции ΔR=0,6 % и временем релаксации т=10 пс, коэффициент отражения которого превышает 99 % для длин волн от 2,3 до 2,65 мкм. Режим стабильной генерации ультракоротких импульсов требует выполнения порогового условия по интенсивности излучения на SESAM [3]:

$$P^{2} > F_{sat,L}F_{sat,A}\Delta R \cdot A_{eff,L}A_{eff,A}\frac{1}{T_{R}^{2}}, \quad (1)$$

где:

Р – внутререзонаторная мощность;

*F*<sub>*sat I*</sub> – поток насыщения активной среды;

 $F_{satA}$  – поток насыщения SESAM;

*F<sub>effL</sub>* – эффективная площадь сечения моды в активной среде;

 $F_{eff,A}$ – эффективная площадь моды на SESAM;  $T_R^2$  – время обхода резонатора.

Выполнению условия (1) способствует повышение внутрирезонаторной мощности и уменьшение размера пятна на насыщающемся зеркале. Для фокусировки излучения на SESAM в резонатор дополнительно помещено сферическое зеркало радиусом 50 мм.

В качестве активной среды использован монокристалл Cr<sup>2+</sup>:ZnSe длиной 3 мм, выращенный в ФИАН методом осаждения из газовой фазы. В качестве источника накачки использован тулиевый волоконный непрерывный лазер с выходной мощностью до 10 Вт и длиной волны генерации А<sub>нак</sub>=1,908 мкм. Поскольку активная среда обладает положительной дисперсией групповых скоростей, возникающие в лазере импульсы будут уширяться при распространении через активную среду [4]. С целью компенсации дисперсии в одну из ветвей резонатора введена плоскопараллельная пластинка из сапфира, ориентированная под углом Брюстера к оптической оси. В отличие от кристалла Cr<sup>2+</sup>:ZnSe сапфировая пластинка обладает отрицательной дисперсией групповых скоростей.

Охлаждение активной среды выполняется медным теплоотводом, тепло от которого отводится проточной водой. Диапазон рабочих температур водяного охлаждения лежит в интервале от 9 до 11 С, при больших значениях температуры активная среда испытывает сильное обеднение верхнего рабочего уровня[1], в то время как меньшие приводят к осаждению влаги на поверхности активной среды, что может привести к её повреждению.

Коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора подбирался исходя из баланса между достижением максимально возмож-



Рисунок 1. Схема фемтосекундного лазера среднего ИК-диапазона

ной выходной мощности и обеспечением на SESAM достаточной интенсивности излучения для стабильной генерации лазера в режиме синхронизации мод. Среди зеркал с коэффициентом пропускания, равным 3, 10, 17 и 25 %, оптимальным оказалось зеркало с коэффициентом пропускания по интенсивности 10 %.

# ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

На рисунке 2 изображен экспериментальный стенд, предназначенный для измерения выходных характеристик собранного лазера.



Рисунок 2. Схема экспериментального стенда

Выходной пучок лазера направляется на селективное зеркало для фильтрации остаточного излучения накачки, после чего излучение генерации одновременно подаётся на фотодиод PD24-005-HS и автокоррелятор APE Pulsecheck 10, позволяющий измерять длительности ультракоротких импульсов в диапазоне от 150 фс до 10 пс [5] в коллинеарном и неколлинеарном режимах. В ходе эксперимента проводилась юстировка резонатора, определялся оптимальный угол поворота компенсирующей сапфировой пластинки и изменялась мощность накачки с целью получения максимально коротких и стабильных импульсов. Максимальная средняя выходная мощность в режиме синхронизации мод составила Р=520 мВт.



### Рисунок 3.

### График автокорреляционной функции ультракоротких импульсов исследуемого лазера

На рисунке 3 представлена усредненная автокорреляционная функция ультракоротких импульсов, излучаемых описываемым лазером.

Из графика видно, что ширина автокорреляционной функции по полувысоте составляет 550 фс. Коэффициент пересчёта ширины автокорреляционной функции в длительность импульса в предположении гауссовой формы импульса составляет 1,41 [4]. Разделив ширину автокорреляционной функции на коэффициент пересчёта, получим длительность фемтосекундных импульсов, равную 392 фс.

Рисунок 4 представляет собой осциллограмму ультракоротких импульсов, полученную с помощью фотодиода PD-24-005-HS(sma), время нарастания которого составляет t<sub>нар</sub>=50 пс, а полоса пропускания – 5 ГГц [6].



Рисунок 4.

Осциллограмма ультракоротких импульсов, излучаемых спроектированным лазером

Временные характеристики приёмника не позволяют отображать реальную форму ультракоротких импульсов, однако позволяют оценить их стабильность и частоту повторения. Частота повторения представленных на рисунке 4 импульсов составляет f<sub>rep</sub>=166,6 МГц, что соответствует реальной оптической длине резонатора равной L=900 мм. Несмотря на то, что осциллограмма импульсов на рисунке 4 говорит о высокой кратковременной стабильности импульсов, более широкая горизонтальная развертка, представленная на рисунке 5, показывает значительные нестабильности выходного сигнала лазера:



Рисунок 5. Осциллограмма ультракоротких импульсов, излучаемых спроектированным лазером в интервале от 0 до 20 мкс

Наблюдаемые нестабильности могут быть следствием множества факторов, таких как колебания температуры активной среды и перемещение воздушных масс в комнате, ненулевое значение дисперсии в резонаторе, нестабильность излучения накачки, а также паразитная модуляция добротности, вызываемая SESAM.

На рисунке 6 представлен спектр излучения фемтосекундного лазера. Из рисунка видно, что ширина спектра составляет приблизительно 50 нм с центральной длиной волны 2,48 мкм. В спектре так же различим пик на длине волны 1,908 мкм, что соответствует остаточному излучению накачки.



В работе продемонстрирован твердотельный фемтосекундный лазер среднего ИК-диапазона со средней выходной мощностью до 520 мВт, частотой повторения импульсов 166,6 МГц и длительностью импульса равной 392 фс, работающий на длине волны λ=2,48 мкм. Выходной сигнал лазера нестабилен во времени, в дальнейшем планируется провести ряд исследований с целью его стабилизации.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20431).

#### Список литературы:

1. *Mirov S. et al.* Frontiers of mid-infrared lasers based on transition metal doped II–VI semiconductors //Journal of Luminescence. – 2013. – T. 133. – C. 268-275.;

2. Serebryakov V. A. et al. Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects //Journal of Optical Technology. – 2010. – T. 77. – №. 1. – C. 6-17.

3. *Hönninger C. et al.* Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking //JOSA B. – 1999. – T. 16. – №. 1. – C. 46-56;

4. *Крюков П. Г*. Лазеры ультракоротких импульсов и их применения. – 2012;

5. Технические характеристики автокоррелятора APE Pulsecheck [Электронный ресурс] – Режим доступа https://www.ape-berlin.de/en/autocorrelator/ pulsecheck/. – (Дата обращения: 14.06.2018);

6. Технические характеристики фотодиода PD-24-005-HS(sma) [Электронный ресурс] – Режим доступа http://www.ibsg.ru/. – (Дата обращения: 14.06.2018);

# ВОЛОКОННЫЙ КОЛЬЦЕВОЙ ТУЛИЕВЫЙ ЛАЗЕР С ПАССИВНОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ МОД С УПРАВЛЕНИЕМ СУММАРНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ И ДИСПЕРСИЕЙ РЕЗОНАТОРА

ВОРОПАЕВ В. С.<sup>1</sup>, ДОНОДИН А. И.<sup>1</sup>, ВОРОНЕЦ А. И.<sup>1</sup>, ЛАЗАРЕВ В. А.<sup>1</sup>, ТАРАБРИН М. К.<sup>1,2</sup>, КАРАСИК В. Е.<sup>1</sup>, КРЫЛОВ А. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-Образовательный центр «Фотоника и Инфракрасная техника» МГТУ им. Н. Э. Баумана <sup>2</sup>Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук <sup>3</sup>Научный центр волоконной оптики Российской академии наук, г. Москва

### E-mail: vasek@aport.ru

**Аннотация:** Волоконные тулиевые фемтосекундные лазеры имеют широкий спектр потенциальных применений в науке, технике и медицине: спектроскопия среднего ИК-диапазона, лидары, дистанционное зондирование, обработка полимеров, лазерный скальпель, лазерное дробление камней. Важное значение в этих применениях имеет мощность излучения. В данной работе представлено исследование оригинальной схемы волоконного кольцевого тулиевого лазера с пассивной синхронизацией мод с управлением суммарной нелинейностью и дисперсией резонатора с высокой средней выходной мощностью 378 мВт.

# PASSIVELY MODE-LOCKED THULIUM FIBER RING LASER WITH NONLINEARITY AND DISPERSION MANAGEMENT

VOROPAEV V. S.<sup>1</sup>, DONODIN A. I.<sup>1</sup>, VORONETS A. I.<sup>1</sup>, LAZAREV V. A.<sup>1</sup>, TARABRIN M. K.<sup>1,2</sup>, KARASIK V. E.<sup>1</sup>, KRYLOV A. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Science and Education Center for Photonics and IR-Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow <sup>2</sup>P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow <sup>3</sup>Fiber Optics Research Center of the Russian Academy of Sciences

### E-mail: vasek@aport.ru

**Abstract:** Femtosecond thulium fiber lasers have a wide range of potential applications in science, technology and medicine: mid-IR spectroscopy, lidars, remote sensing, polymer processing, laser scalpel, laser lithotripsy. These applications demand high power lasers. In this paper, we present an investigation of the original scheme of passively mode-locked thulium fiber ring laser with nonlinearity and dispersion management and high average output power of 378 mW.

#### ВВЕДЕНИЕ

Волоконные тулиевые фемтосекундные лазеры имеют широкий спектр потенциальных применений в науке, технике и медицине [1]. В последнее время совершенствуются методы спектроскопия среднего ИК диапазона, так как в этом диапазоне лежит большое число линий поглощения веществ, детектирование которых является важной задачей, например, вредные вещества, такие как угарный газ, вещества, являющиеся биомаркерами различных заболеваний людей. В спектроскопии тулиевые фемтосекундные лазеры могут быть успешно использованы для генерации когерентного суперконтинуума в среднем ИК-диапазоне [2-4]. Использование пространственно-когерентного суперконтнуума в качестве источника для спектроскопии может повысить чувствительность и быстродействие фурье-спектрометров, что важно для быстрого детектирования малых концентраций веществ. Тулиевые фемтосекундные лазеры также находят применения в лидарах, и методах дистанционного зондирования [5]. Из-за большого поглощения полимеров в области длин волн около 1,9 мкм возможна эффективная обработка полимеров с помощью фемтосекундных тулиевых лазеров [6]. В области 1,9 мкм находится пик поглощения воды, что

делает тулиевый фемтосекундный лазер перспективным для использования в медицине в качестве лазерного скальпеля [7-8] и для процедуры лазерного дробления камней в почках [9-10].

В большинстве упомянутых применений требуется высокая пиковая мощность излучения и минимальная длительность импульсов. В данной работе продемонстрировано исследование генерации излучения в полностью волоконном кольцевом тулиевом лазере с пассивной синхронизацией мод при различных длинах пассивного волокна, при этом суммарная внутрирезонаторная дисперсия резонатора изменялась от -0,15 до 0,1 пс<sup>2</sup>, максимальная средняя выходная мощность излучения лазера составила порядка 378 мВт, что соизмеримо с другими высокомощными фемтосекундными туливыми лазерными системами [3,11-12], стоит отметить, что в этой работе не использовался усилитель импульсов, и высокая мощность была достигнута напрямую из лазера.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Схема исследуемого полностью волоконного кольцевого тулиевого лазера с пассивной синхронизацией мод, основанной на нелинейной эволюции поляризации (НЭП) [13-16], изображена на рис. 1.



HNLF – высококонелинейный световод; Тт3+ – тулиевый активный световод;

SMF – световод типа SMF-28; Er/Yb – эрбий-иттербиевый лазер накачки

К преимуществам данной схемы волоконных фемтосекундных лазеров можно отнести наибольшую ширину спектра генерируемого излучения, минимальную длительность импульсов, простоту конструкции, к недостаткам можно отнести высокую чувствительность к внешним воздействиям (сильные вибрации, большие перепады температуры и влажности), невозможность генерации линейно поляризованного излучения напрямую из лазера, трудность достижения частоты повторения импульсов более 100 МГц [17]. Стоит отметить, что в лабораторных условиях при минимальных внешних воздействиях и возможности юстировки, лазер с такой конструкцией резонатора является удобным и простым инструментом для исследований в которых требуются предельно короткие длительности импульсов.

В качестве активной среды в кольцевом резонаторе лазера использовался тулиевый световод длиной 1,473 м с коэффициентом хроматической дисперсии - 68 пс/(нм·км) на длине волны 1,9 мкм и поглощением 58 дБ/м на длине волны 1550 нм. Накачка активного световода осуществляется Er/Yb волоконным лазером, излучающим на центральной длине волны 1550 нм с максимальной выходной мощностью 2,6 Вт, для ввода излучения накачки в активный световод используется спалвной спектральный демультиплексор (WDM). Синхронизация мод достигается методом нелинейной эволюции поляризации излучения в резонаторе лазера. Изолятор-поляризатор служит для однонаправленной генерации в лазере, а также в качестве поляризатора для достижения синхронизации мод методом НЭП [18]. Механические контроллеры поляризации (КП) применяются для настройки режима синхронизации мод. Для вывода излучения из резонатора используется сплавной разветвитель 50/50. Все пассивные компоненты (изоляторполяризатор, разветвитель, WDM) изготовлены из волоконного световода типа SMF-28. Для увеличения нелинейности и компенсации дисперсии в резонаторе лазера, используются высоконелинейный световод длиной 5,107 м (HNLF) с коэффициентом хроматической дисперсии - 56 пс/(нм км) на длине волны 1,9 мкм и световод SMF-28 с коэффициенты хроматической дисперсии 34 пс/(нм·км) на длине волны 1,9 мкм. Увеличение нелинейности требуется для снижения порога синхронизации мод методом НЭП по мощности накачки, а компенсация дисперсии требуется для достижения максимально широкого спектра и минимальной длительности импульсов. Суммарная длина волоконного световода типа SMF-28 в резонаторе уменьшалась от 13,759 до 9,7 м для изменения суммарной внутрирезонаторной дисперсии групповых скоростей (ДГС) в диапазоне от -0,15 до 0,1 пс<sup>2</sup>. На рис. 2, а точками отмечены значения суммарной внутрирезонаторной ДГС



а) – зависимость суммарной внутрирезонаторной ДГС от длины световода SMF-28 в резонаторе;
 б) – зависимость ДГС волоконных световодов, используемых в резонаторе лазера, SMF-28 – чёрная кривая, тулиевый световод – красная кривая, высоконелинейный световод – синияя кривая

в исследуемых схемах лазера зависимости от длины световода SMF-28. На рис.26 представлена значения ДГС всех типов волоконных световодов, используемых в лазере, в зависимости от длины волны.

Синхронизация мод получена с помощью юстировки двух котроллеров поляризации в каждой схеме лазера. Оптический спектр лазера измерялся с помощью монохроматора ЛОМО МДР-206. Автокорреляция фемтосекундных импульсов измерялась на автокорреляторе АА-10DDM фирмы «Авеста-проект». Мощность излучения измерялась с помощью теплового измерителя мощности фирмы Ophir. Осциллограммы фемтсоекундных импульсов сняты с приёмника PDA10D фирмы Throlabs с полосой пропускания 15 МГц.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Во всех исследуемых схемах лазера, различающихся значением суммарной внутрирезонаторной ДГС, при различных настройках контроллеров поляризации <del>было</del> получено два режима генерации отличающихся шириной спектра на полувысоте. Для простоты дальнейшего изложения в целях различия этих двух режимов будем называть один из них режимом с широким спектром, а другой – режимом с узким спектром. На рис. 3 приведены зависимости ширины спектра и длительности импульсов на полувысоте от суммарной внутрирезонаторной ДГС для режимов с широким (рис. 3, а) и узким спектром (рис. 3, б). Из рис. 3, а видно, что в режиме с широким спектром наибольшая ширина спектра на полувысоте равная 56 нм получилась в схеме с внутрирезонаторной дисперсией равной 0,04 пс<sup>2</sup>, длительность импульсов в данном режиме составила 143 фс. Для режима с узким спектром (рис. 3, б) наибольшая ширина спектра на полувысоте оказалась равной 33 нм в схеме со значением внутрирезонаторной ДГС равной -0,017 пс<sup>2</sup>, при этом длительность импульсов была равна 182 фс.

Важной характеристикой режима является произведение полуширины спектра на длительность импульса (TBP=time-bandwidth product), по значению этой величины можно оценить, является ли импульс спектрально ограниченным, либо его длительность можно уменьшить в среде с дисперсией. На рис. 4, а приведены значения произведения полуширины спектра на длительность импульса для широкого и узкого спектров в зависимости от значения суммарной внутрирезонаторной дисперсии. Значения ТВР для широкого спектра лежат в диапазоне от 0,5 до 1,1. Для узкого спектра ТВР лежит в диапазоне от 0,36 до 0,6. Для спектрально ограниченных импульсов с гауссовым спектром и со спектром, имеющим форму sech<sup>2</sup>, ТВР равен 0,441 и 0,315 соответственно, исходя из этих значений можно предположить, что импульсы, генерируемые лазером, не являются спектрально ограниченными и их длительность можно уменьшить, однако это предположение необходимо подтвердить экспериментально.





Зависимость ширины спектра и длительности импульсов на полувысоте от суммарной внутрирезонаторной ДГС: а) – для широкого спектра; б) – для узкого спектра



a) – зависимость произведения ширины спектра на длительность импульсов от суммарной внутрирезонаторной ДГС, режим с широким спектром – чёрный, режим с узким спектром – красный; б) – зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки

На рисунке 4, б приведена измеренные значения выходной мощности лазера от мощности накачки и линейная аппроксимация измерений, порог генерации лазера равен 400 мВт, максимальная мощность генерации равна 378 мВт.

Ниже представлены характеристики режимов с самыми широкими спектрами среди широких (рис. 5) и узких спектров (рис. 6). В схеме с длиной SMF-28 равной 10,735 м и суммарной внутрирезонаторной ДГС 0,04 пс<sup>2</sup> импульсы генерировались с частотой повторения равной 11,68 МГц на центральной длине волны 1950 нм, ширина спектра на полувысоте составила 56 нм. Оценка длительности импульсов по автокорреляции интенсивности (рис.5б) составила 143 фс, при учёте гауссовой формы импульсов.

Как упоминалось выше, наиболее широкий спектр в случае работы лазера в режиме «узкого спектра» получился в схеме с длиной SMF-28 равной 11,619 м и суммарной внутрирезонаторной ДГС -0,017 пс<sup>2</sup> импульсы генерировались с частотой повторения равной 11,16 МГц на центральной длине волны 1953 нм, ширина спектра на полувысоте составила 33 нм. Оценка длительности импульсов по автокорреляции интенсивности (рис. 6, б) составила 182 фс, при учёте гауссовой формы импульсов.

Исходя из оценок длительности импульсов, можно оценить энергию и пиковую мощность импульсов, генерируемых в лазере в двух ре-



### Рисунок 5.

Характеристики излучения лазера в режиме с широким спектром при значении суммарной внутрирезонаторной ДГС равной 0,04 nc<sup>2</sup>: a) – оптический спектр, б) – интерферометрическая автокорреляция и автокорреляция по интенсивности



Характеристики излучения лазера в режиме с широким спектром при значении суммарной внутрирезонаторной ДГС равной -0,017 пс²,

a) – оптический спектр, красная кривая – гауссовая аппроксимация, чёрная – измеренные данные, б) – интерферометрическая автокорреляция и автокорреляция по интенсивности

жимах. Так, для режима с широким спектром оценка пиковой интенсивности составила 226 кВт при энергии 32,3 нДж, а для режима с узким спектром – 186 кВт при энергии в импульсе 33,8 нДж.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование генерации излучения в полностью волоконном кольцевом тулиевом лазере с пассивной синхронизацией мод при различных длинах пассивного световода, при этом суммарная внутрирезонаторная дисперсия резонатора изменялась в диапазоне от -0,15 до 0,1 пс<sup>2</sup>. В каждой схеме лазера было получено два типовых режима: с узким спектром и с широким спектром. На основании анализа всех схем, были отмечены наилучшие режимы генерации среди режимов с широким спектром и отдельно среди режимов с узким спектром.

Наилучший режим среди широких спектров был получен в схеме с длиной SMF-28 равной 10,735 м и суммарной внутрирезонаторной ДГС 0,04 пс<sup>2</sup>, импульсы генерировались на центральной длине волны 1950 нм с частотой повторения 11,68 МГц, ширина спектра составила 56 нм, длительность импульсов составила 143 фс, при максимальной мощности лазера равной 378 мВт пиковая интенсивность равна 226 кВт при энергии в импульсе 32,3 нДж.

Наилучший режим среди узких спектров был получен в схеме с длиной SMF-28 равной

11,619 м и суммарной внутрирезонаторной ДГС -0,017 пс<sup>2</sup>, импульсы генерировались на центральной длине волны 1953 нм с частотой повторения 11,619 МГц, ширина спектра составила 33 нм, длительность импульсов составила 182 фс, при максимальной мощности лазера равной 378 мВт пиковая интенсивность равна 186 кВт при энергии в импульсе 33,8 нДж.

Энергетические характеристики полученных режимов генерации соизмеримы с другими высокомощными фемтосекундными лазерными системами, стоит отметить, что в этой работе не использовался усилитель импульсов, и высокая мощность была достигнута напрямую из лазера.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10694).

#### Список литературы:

1. *Rudy C.W.* Advances in 2-Im Tm-doped modelocked fiber/ Charles W. Rudy, Michel J.F. Digonnet, Robert L. Byer // Optical Fiber Technology. – Vol. 20, pp. 642-649. 2014. Doi:10.1016/j.yofte.2014.06.005

2. *Irnis Kubat et al.* Thulium pumped mid-infrared 0.9–9µm supercontinuum generation in concatenated fluoride and chalcogenide glass fibers/ Irnis Kubat, Christian Rosenberg Petersen, Uffe Visbech Møller, Angela Seddon, Trevor Benson, Laurent Brilland, David Méchin, Peter M. Moselund, and Ole Bang, *//* – Optics Express. Vol. 22, no. 4, pp. 3959-3967. 2014 – doi:10.1364/OE.22.003959
3. *Reza Salem et al.* Mid-infrared supercontinuum generation spanning 1.8 octaves using step-index indium fluoride fiber pumped by a femtosecond fiber laser near 2  $\mu$ m / Reza Salem, Zack Jiang, Dongfeng Liu, Robert Pafchek, David Gardner, Paul Foy, Mohammed Saad, Doug Jenkins, Alex Cable, and Peter Fendel // Optics Express. Vol. 23, pp. 30592-30602. 2015 doi: 10.1364/OE.23.030592

4. J. Olson, Y. H. Ou, A. Azarm, Kieu K. Dual Comb Spectroscopy with a Free-Running Bi-Directional Mode-Locked Thulium Fiber Laser / J. Olson, Y. H. Ou, A. Azarm, Kieu K. // Conference on Lasers and Electro-Optics San Jose, California United States 13–18 May 2018, paper STh4K.6 doi: 10.1364/CLEO\_SI.2018. STh4K.6

5. *Orr B.J.* Infrared LIDAR Applications in Atmospheric Monitoring / Brian J. Orr // Encyclopedia of Analytical Chemistry (eds R. A. Meyers and M. W. Sigrist). doi:10.1002/9780470027318.a0711

6. *T. Hoult*, "Understanding processing with thulium fiber lasers", Industrial Laser Solutions, 27 November 2013.

7. *D. Theisen-Kunde, V. Ott, R. Brinkmann, R. Keller*, "Hemostasis of Dissected Vessels Using a cw 2lm-Laser-Scalpel", European Conference on Biomedical Optics, Munich, Germany, June 12, 2005.

8. *Amini-Nik S et al.* Ultrafast Mid-IR Laser Scalpel: Protein Signals of the Fundamental Limits to Minimally Invasive Surgery / Saeid Amini-Nik, Darren Kraemer, Michael L. Cowan, Keith Gunaratne, Puviindran Nadesan, Benjamin A. Alman, R. J. Dwayne Miller //. PLoS ONE 5(9): e13053. 2010 doi:10.1371/journal. pone.0013053

9. *Ilya Yaroslavsky et al.* Optimization of a novel Tm fiber laser lithotripter in terms of stone ablation efficiency and retropulsion reduction femtosecond Lithotripsy / Ilya Yaroslavsky, Victoria Vinnichenko, Tyler McNeilla, Anna Novoseltseva, Igor Perchuka, Alexander Vybornov, Gregory Altshuler, and Valentin Gapontsev // Proc. SPIE 10468, Therapeutics and Diagnostics in Urology 2018, 104680H (7 February 2018); doi: 10.1117/12.2291089

10. *Qiu J et al.* Femtosecond laser lithotripsy: feasibility and ablation mechanism / Qiu J, Teichman JM, Wang T, Neev J, Glickman RD, Chan KF, Milner TE. // Journal of Biomedical Optics. 15(2):028001. 2010 Mar-Apr; doi:10.1117/1.3368998.

11. *Chernysheva M. A. et al.* Higher-Order Soliton Generation in Hybrid Mode-Locked Thulium-doped Fiber Ring Laser / Maria A. Chernysheva, Alexander A. Krylov, Chengbo Mou, Raz N. Arif, Alex G. Rozhin, Mark H. Rmmeli, Sergey K. Turitsyn, and Evgeny M. Dianov // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 20, no. 5, pp. 425-432, Sept.-Oct. 2014. doi: 10.1109/JSTQE.2014.2307757

12. *G. Imeshev and M. E. Fermann*, 230-kW peak power femtosecond pulses from a high power tunable source based on amplification in Tm-doped fiber / G. Imeshev and M. E. Fermann // Optics Express 13, 7424-7431 (2005) doi: 10.1364/OPEX.13.007424

13. *Dvoretskiy D. A. et al.* Generation of ultrashort pulses with minimum duration of 90 fs in a hybrid mode-locked erbium-doped all-fibre ring laser / D A Dvoretskiy, S G Sazonkin, V S Voropaev, M A Negin, S O Leonov, A B Pnev, V E Karasik, L K Denisov, A A Krylov, V A Davydov, E D Obraztsova // QUANTUM ELECTRON, 2016, 46 (11), 979–981. Doi: 10.1070/ QEL16142

14. *V. A. Lazarev et al.* Stable Similariton Generation in an All-Fiber Hybrid Mode-Locked Ring Laser for Frequency Metrology / Vladimir Lazarev, Alexander Krylov, Dmitriy Dvoretskiy, Stanislav Sazonkin, Alexey Pnev, Stanislav Leonov, Dmitriy Shelestov, Mikhail Tarabrin, Valeriy Karasik, Alexey Kireev, Mikhail Gubin // IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, vol. 63, no. 7, pp. 1028-1033, July 2016. DOI: 10.1109/ TUFFC.2016.2542368

15. *D.A. Dvoretskiy et al.* High-energy, sub-100 fs, allfiber stretched-pulse mode-locked Er-doped ring laser with a highly-nonlinear resonator / Dmitriy A. Dvoretskiy, Vladimir A. Lazarev, Vasiliy S. Voropaev, Zhanna N. Rodnova, Stanislav G. Sazonkin, Stanislav O. Leonov, Alexey B. Pnev, Valeriy E. Karasik, and Alexander A. Krylov // Optics Express, 23 (26), pp. 33295-33300. DOI: 10.1364/OE.23.033295

16. *V. Voropaev et al.* All-fiber passively mode-locked ring laser based on normal dispersion active Tm-doped fiber / Vasilii Voropaev, Alexander Donodin, Vladimir Lazarev, Mikhail Tarabrin, Valerii Karasik, and Alexander Krylov // Frontiers in Optics 2017 Washington, D.C. United States 18–21 September 2017, OSA Technical Digest, paper JTu3A.15. DOI: 10.1364/FIO.2017. JTu3A.15

17. *Stefan Droste et al.* Optical Frequency Comb Generation based on Erbium Fiber Lasers / Stefan Droste, Gabriel Ycas, Brian R. Washburn, Ian Coddington, and Nathan R. Newbury // Nanophotonics. Vol.5 (2), pp:196–213 (2016). Doi:10.1515/ nanoph-2016-0019

# МЕТОД ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ВОЛОКОННОГО ЭРБИЕВОГО ЛАЗЕРА С ПОМОЩЬЮ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТА

## ДОНОДИН А. И.\*, ВОРОПАЕВ В.С.\*, ЛАЗАРЕВ В.А.\*, ТАРАБРИН М. К.\*,\*\*, КАРАСИК В. Е.\*

\*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва \*\*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

E-mail: don1sandr@mail.ru

**Аннотация:** Благодаря своим уникальным свойствам фемтосекундные лазеры находят применение в различных областях науки, техники и медицины. Для применений, связанных с прецизионными измерениями оптических частот и времени, требуются генераторы стабильных гребенок оптических частот. Для создания таких генераторов необходимо уменьшить влияние различных внешних и внутренних шумов на частоту повторения импульсов фемтосекундного лазера. Одним из методов минимизации шумов и подстройки частоты повторения является изменение длины резонатора с помощью пьезоэлемента. В работе исследован метод подстройки частоты повторения импульсов волоконного фемтосекундного эрбиевого лазера с помощью трех различных коммерческих пьезоэлементов, исследовано изменение частоты повторения импульсов от напряжения синусоидального сигнала, поданного на пьезоэлемент с приклеенным световодом резонатора лазера и найден коэффициент связи максимального утолщения пьезоэлемента и растяжения световода.

**Ключевые слова:** фемтосекундный волоконный эрбиевый лазер, средний ИК-диапазон, стабилизация частоты повторения импульсов.

# METHOD OF PULSE REPETITION RATE STABILIZATION OF FEMTOSECOND ERBIUM FIBER LASER WITH PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

## DONODIN A. I.\*, VOROPAEV V.S.\*, LAZAREV V.A.\*, TARABRIN M.K.\*,\*\*, KARASIK V.E.\*

## \*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

\*\* P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: don1sandr@mail.ru

**Abstract:** Due to unique features of femtosecond lasers, they are used in various fields of science, technology and medicine. For precise determination of time and frequency high stable self-referenced frequency combs should be used. Influence of various external and internal noises on pulse repetition rate have to be reduced for developing such comb. One of the methods of minimization of these noises and

stabilization of pulse repetition rate is cavity length variations using piezoelectric transducer. In this work we investigate method of pulse repetition rate stabilization of femtosecond fiber laser, using three different commercial piezoelectric transducers; we investigate pulse repetition rate change due to sinusoidal signal applied to the piezoelectric transducer with a laser resonator waveguide glued to it. Coefficient of modulation transmission from piezoelectric transducers to fiber was found.

Keywords: femtosecond fiber erbium laser, mid infrared, pulse repetition rate stabilization.

#### ВВЕДЕНИЕ

Фемтосекундные лазеры имеют широкий спектр применений: прецизионная спектроскопия [1], системы глобального позиционирования [2], микроскопия [3] и другие. Однако для того чтобы эффективно использовать такие лазеры, необходимо стабилизировать гребенку оптических частот, которую излучает такой лазер [2-4]. Изначально эта гребенка нестабильна из-за влияния шумов [5]. Причиной нестабильности гребенки являются шумы, источниками которых могут являться суперлюминисценция внутри резонатора и усилителя, флуктуация мощности и спектра накачки, изменения температуры и влажности, вибрации и другие факторы.

Частотную структуру гребенки можно описать выражением [5]:

$$f_{n} = n \cdot f_{rep} + f_{ceo} , \qquad (1)$$

где  $f_n$  – частота n-ой моды частотной гребенки (обычно n~10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup>),  $f_{rep}$  – частота повторения импульсов,  $f_{ceo}$  – отстройка гребёнки относительно нуля на значение, определяемое фазовым сдвигом между несущей и огибающей.

Из выражения (1) видно, что для стабилизации гребенки необходимо устранить флуктуации двух компонент  $f_{ceo}$  и  $f_{rep}$ . В данной работе рассматривается возможность стабилизации частоты повторения  $f_{rep}$ , как первый шаг к полной стабилизации гребенки частот. Частота повторения импульсов лазера определяется простым выражением:

где с – скорость света, n – показатель преломления резонатора, L – длина резонатора

Из выражения (2) видно, что частоту повторения импульсов можно подстраивать, изменяя показатель преломления и длину резонатора, поэтому можно использовать четыре основных управляющих элемента для изменения частоты повторения импульсов: ЭОМ (электрооптический модулятор), пьезоэлемент [2,6], элемент Пельтье [7] и источник накачки [5,8] (частота повторения изменяется вследствие влияния нелинейных эффектов, вызванных изменением мощности накачки).

Для стабилизации частоты повторения обычно используются два управляющих элемент: «быстрый» и «медленный». Для стабилизации длительных изменений частоты повторения используется элемент Пельтье, который, несмотря на свое низкое быстродействие (менее 0,1 Гц), обладает широким диапазоном подстройки (более 400 Гц подстройки частоты повторения импульсов). В качестве быстрого управляющего элемента обычно используется ЭОМ или пьезоэлемент из-за их высокого быстродействия. Изменение мощности накачки в большей степени влияет на f<sub>сео</sub> и является удобным методом для ее подстройки, однако в работах [5] и [8] представлены исследования зависимости частоты повторения от мощности накачки.

В нашей работе исследуется возможность создания системы подстройки частоты с помощью пьезоэлемента, потому что она обладает высоким быстродействием, является недорогим и простым средством для управления длиной резонатора. Обычно в волоконных лазерах пьезокерамика используется для растягивания световодов; на пьезокерамическом актюаторе может размещаться одно из зеркал резонатора в случае неволоконного исполнения [2,5]. В данной работе исследуется метод подстройки частоты повторения, в ходе которого участок световода резонатора волоконного лазера приклеивается к пьезоэлементу. В работе исследованы флуктуации частоты повторения импульсов коммерческого фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера фирмы «Авеста-Проект». На основании нестабильности частоты повторения импульсов лазера и анализа уже существующих систем стабилизации для подстройки частоты повторения импульсов выбраны и исследованы три пьезоэлемента: PC4FL и PA25LEW фирмы Thorlabs и ПЗ производства НИИ ЭЛПА.

#### ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ЛАЗЕРА

Для дальнейшей стаилизации частоты повторения импульсов исследовался полностью волоконный эрбиевый фемтосекундный лазер с пассивной синхронизацией мод фирмы «Авеста-Проект». Общая длина волоконных световодов резонатора – 2,9 метров, лазер обладает следующими выходными характеристиками: импульсы длительностью 120 фс, с шириной спектра 56 нм на центральной длине волны 1555 нм, средней выходной мощностью 30 мВт и частотой повторения импульсов 71 МГц. Также в лазере предусмотрена система термостабилизации, которая поддерживает температуру резонатора лазера на уровне 26 °C ± 0,3°С, что соответствует флуктуациям частоты повторения импульсов ± 160 Гц.

С помощью частотомера Agilent Technologies 53181А проведен эксперимент по измерению частоты повторения импульсов лазера  $f_{\rm ren}$  в

свободном режиме в течение 3 часов. На рисунке 1 (слева) представлены первые 50 секунд измерения. Для того чтобы оценить нестабильность частоты повторения при времени усреднения от 1 мс до 10 с, найдена относительная девиация Аллана (среднее квадратическое двухвыборочное отклонение частоты) (рисунок 1, б).

На графике виден длительный уход, вызванный изменением темперуатуры. Это изменение частоты повторения можно подстраивать с помощью элемента Пельтье, прикленного на световод [7]. Для компенсации быстрых изменений частоты повторения импульсов может быть использован метод подстройки частоты повторения импулсьов с помощью пьезоэлемента.

На графике относительной девиации Алана видно, что нестабильность лазера совпадает с нестабильностью кварцевого осциллятора при времени усреднения менее 0,1 с. Это вызвано тем, что измерения ограничиваются стабильностью кварцевого генератора, то есть на самом деле стабильность лазера может как совпадать со стабильностью эталона, так и быть лучше нее.

Для реализации системы кратковременной стабилизации частоты лазера необходимо знать нестабильность лазера при времени усреднения менее 10 с. При времени усреднения 1 с относительная девиация Аллана равна





Показания с частотомера за 50 с при времени усреднения 0,1 с (а), где  $\Delta f_{rep}$  – изменение частоты повторения импульсов относительно среднего значения, относительная девиация Аллана (б)

5·10<sup>-10</sup>. Следовательно, чтобы устранить случайные уходы частоты повторения, пьезоэлемент должен подстраивать частоту повторения импульсов на величину 0,2 Гц по правилу трех сигм с быстродействием более 10 Гц.

# ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для создания системы кратковременной стабилизации необходимо выбрать пьезоэлемент, способный подстраивать частоту повторения более, чем на, 0,2 Гц и обладать быстродействием более 10 Гц. Рассмотрим более подробно зависимость частоты повторения импульсов от растяжения волокна.

Из выражения (2) видно, что частота повторения импульсов  $f_{rep}$  обратно пропорциональна длине резонатора L. Пусть пьезоэлемент удлинился на величину  $\Delta L$ , тогда приращение частоты повторения импульсов  $\Delta f_{rep}$  будет равно:

$$\Delta f_{rep} = \frac{c}{(L + \Delta L)n} - \frac{c}{Ln}.$$
 (3)

Выразим удлинение пьезоэлемента ΔL для подстройки частоты повторения на величину Δ*f*<sub>ren</sub> и получим следующее выражение:

$$\Delta L = \frac{c}{\Delta f_{rep} n + c/L} - L. \tag{4}$$

Найдем, какое перемещение должен совершать пьезоэлемент для подстройки частоты повторения импульсов лазера на 0,2 Гц. При длине резонатора 2,9 м, показателе преломления световода резонатора n=1,442 удлинение Δ*L* равно 10 нм. Однако из-за того, что, во-первых, клей и волокно неэластичны, во-вторых, перемещение пьезоэлемента максимально в центре пьезоэлемента, и минимально на краях, и, в-третьих, в паспорте приведены перемещения пьезоэлемента в свободном режим без нагрузки, а в работе к торцу пьезоэлемента приклеивается световод, световод растягивается на меньшую величину, чем максимальное удлинение пьезоэлемента. В статье [6] коэффициент связи максимального утолщения пьезоэлемента и растяжения световода равен 0,1. Следовательно, максимальное перемещение должно быть не меньше 100 нм, чтобы обеспечить устранение нестабильности частоты повторения импульсов.

Это приближение является грубым, и нельзя точно сказать, как сильно будет растянут световод без проведения экспериментального исследования. Более того при использовании лазера не в лабораторных условиях нестабильность частоты повторения импульсов увеличивается из-за воздействия внешних факторов: вибраций, резких температурных изменений, вращений (при транспортировке). Поэтому необходимо увеличить запас на максимальное перемещение пьезоэлемента. Исходя из требований, выбраны пьезоэлементы, характеристики которых представлены в таблице 1.

В таблице представлены основные параметры пьезоэлементов: U<sub>max</sub> – предельно допустимое напряжение, ΔL<sub>max</sub> – максимальное удлинение пьезоэлемента, ΔL (200В) – максимальное удлинение при подаче 200 В (обусловлено максимальным напряжением пьезодрайвера), резонансная частота, размеры и форма.

При максимальном быстродействии 100 Гц не нужно учитывать влияние резонансной частоты на пьезоэлемент, однако для создания системы кратковременной стабилизации с быстродействием более 1 кГц необходимо знать влияние резонансной частоты на АЧХ, а также ее изменение в зависимости от крепления пьезоэлемента [6].

Модель	U <sub>max</sub> , B	ΔL <sub>max</sub> , мкм	ΔL (200B), мкм	Резонансная частота, кГц	Размеры, мм	Форма
П3 (НИИ ЭЛПА)	600	1,8	0,6	135	Ø12x3	Диск
PC4FL (Thorlabs)	150	4,6	4,6	240	5x5x5	Пластина
PA25LEW (Thorlabs)	200	3,3	3,3	235	Ø9.6x2	Диск

Таблица 1. Характеристики выбранных пьезоэлементов

# ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Световод SMF-28, очищенный с помощью ацетона от защитной оболочки из полиметилметакрилата, прикреплялся к пьезоэлементу с помощью суперклея на основе цианоакрилата. Пьезоэлемент установливался в переходную плату. Схема крепления световода к пьезоэлементу представлена на рисунке 2. Переходная плата крепилась к базе лазера. Эксперимент проводился и со световодом в защитной оболочке, однако изменения частоты повторения импульсов не наблюдалось, предположительно из-за того что защитная оболочка скользила по световоду.



Рисунок 2. Схема крепления световода к пьезоэлементу

Данный способ крепления не позволяет избавиться от акустических резонансов, возникающих при подаче переменного сигнала на пьезоэлемента с приклеенным волокном. Однако такие резонансы возникают на частоте выше 1 кГц, поэтому они не могут повлиять на работу пьезоэлемента на частотах модуляции, исследованных в данной работе (от 0,1 до 100 Гц). В статье [6] рассмотрены способы крепления пьезоэлемента, позволяющие уменьшить влияние акустических резонансов на резонансную частоту пьезоэлемента.

Для того чтобы оценить влияние пьезоэлемента на частоту повторения импульсов волоконного фемтосекундного лазера измерялась зависимость частоты повторения импульсов от напряжения, поданного на пьезоэлемент  $\Delta f_{rep} / \Delta U$  и максимальный диапазон подстройки частоты повторения. Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.



Рисунок 3. Структурная схема установки для определения  $\varDelta f_{rev}/\Delta U$ 

Синусоидальный сигнал с частотами 0,1 Гц, 1 Гц, 10 Гц и 100 Гц и размахом 200 В, смещением 100 В с помощью генератора сигналов и пьезодрайвера подавался на пьезоэлементы ПЗ и PA25LEW, и сигнал такой же формы и частоты с размахом 150 В и смещением 75 В на пьезоэлемент PC4FL. График зависимости напряжения на пьезоэлементе от времени представлен на рисунке 4 (красный график).



#### Рисунок 4.

Зависимость напряжения на пьезоэлементе от времени (красный) и изменение частоты повторения импульсов во времени (черный), где f<sub>rep</sub>0 – минимальная частота повторения импульсов, равная 72186202 Гц в данном эксперименте

При этом наблюдалась синусоидальная зависимость частоты повторения импульсов при изменении толщины пьезоэлемента. График изменения частоты повторения импульсов лазера во времени представлен на рисунке 4 (черный). Из графиков были получены размах модуляции напряжения  $\Delta U$  и изменение часто-



Рисунок 5.

a) – график зависимости изменения частоты повторения  $\Delta f_{rep}$  от частоты модуляции, б) – график зависимости  $\Delta f_{rep}/\Delta U$  от частоты модуляции

ты повторения импульсов Δ*f*<sub>rep</sub> путем фильтрации долговременных уходов для каждой частоты модуляции (рисунок 5 а). Из полученных величин найдена величина Δ*f*<sub>rep</sub>/Δ*U* для разных частот модуляции. Полученная характеристика представлена на рисунке 5 (б).

Из графика видно, что из-за высокой нестабильности кварцевого осциллятора при времени усреднения 1 мс не удалось увидеть модуляцию частоты повторения импульсов с частотой 100 Гц для пьезоэлемента ПЗ. График зависимости максимальной глубины модуляции от частоты подаваемого сигнала при максимальном напряжении (200 В для пьезоэлементов ПЗ и PA25LEW и напряжении 150 В для PC4FL) представлен на рисунке 5 (а).

Из графиков видно, что все пьезоэлементы позволяют подстраивать частоту повторения на 0,1 Гц, однако пьезоэлемент PC4FL обладает наибольшим диапазоном подстройки, равным 9,6 Гц при частоте модуляции 0,1 Гц. Оценим коэффициент передачи модуляции от пьезоэлемента волокну. Согласно выражению (4) получим, что при подстройке частоты повторения на 9,6 Гц световод удлинится на величину ΔL = 0,44 мкм, что является 0,095 от максимального перемещения пьезоэлемента. Пьезоэлемент PA25LEW обладает наибольшим измеренным диапазоном подстройки, равным 5,7 Гц при частоте модуляции10 Гц. Если аналогично оценить удлинение световода ΔL,

то оно равно 0,23 мкм, что соответствует 0,07 максимального перемещения. Пьезоэлемент ПЗ обладает максимальным диапазоном подстройки частоты повторения импульсов равным 4,2 Гц на частоте модуляции 10 Гц. Если аналогично оценить удлинение световода ΔL, то оно равно 0,126 мкм, что соответствует 0,21 максимального перемещения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты по оценке зависимости подстройки частоты повторения от поданного напряжения ( $\Delta f_{rep}/\Delta U$ ) и максимального диапазона подстройки частоты повторения импульсов фемтосекундного эрбиевого волоконного лазера. Коэффициенты передачи растяжения волокна равны для элементов PC4FL - 0,095; PF25LEW - 0,07; и П3 - 0,21, что хорошо коррелируются с аналогичными работами. Полученные результаты позволяют создать систему подстройки частоты повторения импульсов для кратковременной (до 10 с) стабилизации частоты повторения импульсов. Однако для создания системы долговременной стабилизации частоты повторения импульсов вместе с пьезоэлементом PC4FL необходимо использовать элемент Пельтье в качестве управляющего элемента, обладающего большим динамическим диапазоном, позволяющим подстроить частоту повторения импульсов в диапазоне более 100 Гц.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10694).

#### Список литературы:

1. *Bernhardt B*. "Dual comb spectroscopy" – Dissertation an der Fakultat fur Physik der Ludwig-Maximilians-Universitat Munchen, 150, 2011

2. *Kireev A.N., et al.*, "Femtosecond optical-tomicrowave frequency divider with a relative instability of  $10^{-14} - 10^{-16}$  (t = 1 - 100 s)" – Quantum Electronics 46 (12) 1139 – 1141 (2016).

3. *Pastirk I., et al.*, "Ultrafast fiber lasers: practical applications" – Proc. of SPIE Vol. 9467 946728-1, 2015.

4. *Крюков, П.Г.* Лазеры ультракоротких импульсов и их применения: Учебное пособие / П.Г. Крюков. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012. - 248 с. 5. Stefan Droste, Gabriel Ycas, et al., "Optical Frequency Comb Generation based on Erbium Fiber Lasers", Nanophotonics (2016).

6. *L. C. Sinclair et al.*, "A compact optically coherent fiber frequency comb", 86, 081301 (2015); doi: 10.1063/1.4928163

7. Леонов С.О., Лазарев В.А. и др. «Влияние температуры на частоту повторения импульсов в полностью волоконном кольцевом эрбиевом лазере с гибридной синхронизацией мод»/ – «Фотон-экспресс» №6(142), с. 47-48, 2017 г;

8. Донодин А.И., Воропаев В.С. и др. «Влияние мощности накачки на частоту повторения импульсов в волоконном кольцевом эрбиевом лазере с синхронизацией мод» / – Сборник научных трудов к конференции «Лазеры в науке, технике, медицине», Москва, – Том 28, – с 70-73, 2017 г;

# УДК 621.373.826



# ПЕРСПЕКТИВНЫЙ НЕПРЕРЫВНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Cr<sup>2+</sup>:CdSe

## УСТИНОВ Д. В.\*, ТАРАБРИН М. К.\*,\*\*, ЛАЗАРЕВ В. А.\*, КАРАСИК В. Е.\*

# \*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва \*\*Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук

E-mail: dmtry.ustinov@gmail.com

Аннотация: Продемонстрирована непрерывная генерация в Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазере с близким к концентрическому резонатором с тремя разными выходными зеркалами. Оптическая накачка осуществлялась с помощью тулиевого волоконного лазера с длиной волны 1,908 мкм. Получена выходная мощность 1,06 Вт при поглощенной мощности накачки 2,6 Вт с дифференциальным КПД 41,6 %.

**Ключевые слова:**  $Cr^{2+}:CdSe$ -лазер, средний ИК-диапазон, кристаллы группы  $A_2B_6$ , твердотельные лазеры.

# PERSPECTIVE CONTINUOUS-WAVE SOLID-STATE Cr<sup>2+</sup>:CdSe LASER

DMITRY V. USTINOV\*, MIKHAIL K. TARABRIN\*,\*\*, VLADIMIR A. LASAREV\*, VALERY E. KARASIK\* \*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

\*\* P.N.Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: dmtry.ustinov@gmail.com

**Abstract:** We demonstrate the operation of solid-state continuous-wave  $Cr^{2+}$ :CdSe laser pumped by Tmfiber laser at 1,908 µm. The laser cavity was close to concentric. We obtained a maximum CW output power of 1,06 W with an incident absorbed pump power of 2,6 W and slope efficiency of 41,6 %.

**Keywords:** Cr<sup>2+</sup>:CdSe laser, mid infrared, A<sub>2</sub>B<sub>6</sub> crystals, solid-state lasers.

#### ВВЕДЕНИЕ

Лазеры, работающие ИКв среднем диапазоне (2 – 5 мкм), представляют большой интерес для ряда задач: в первую очередь, в данном диапазоне расположено множество линий поглощения воды, поэтому эти лазеры могут использоваться для различных медицинских применений, таких как хирургия, диагностика заболеваний и др. [1]. Также в среднем ИК-диапазоне находятся линии поглощения ряда молекул газов, что позволяет использовать данные лазеры для спектроскопии высокого разрешения, дистанционного зондирования атмосферы и других применений.

Среди источников, используемых в среднем ИК-диапазоне, можно выделить лазеры на кристаллах халькогенидов группы  $A_2B_6$  (CdSe, CdS, ZnSe и др.) [2 – 4], легированных двухвалентными ионами переходных металлов (Cr<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> и др.). Полоса люминесценции таких кристаллов лежит в диапазоне 2 – 5 мкм и обладает шириной около 1 мкм, что позволяет получать генерацию в широком спектральном диапазоне. Полосы поглощения с центром вблизи

1,9 мкм позволяют использовать в качестве источников накачки тулиевые волоконные лазеры, обладающих более высокой направленностью излучения по сравнению с линейками лазерных диодов [5].

В данной работе продемонстрирована непрерывная генерация Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера. Накачка осуществлялась тулиевым волоконным лазером на длине волны 1,908 мкм. Рассмотрена работа лазера с тремя выходными зеркалами, имеющими разные коэффициенты пропускания, и на основе полученных данных оценены внутренние потери. Получена выходная мощность 1,06 Вт при поглощенной мощности накачки 2,6 Вт с дифференциальным КПД 41,6 %.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения экспериментов был собрана установка, схема которой показана на рисунке 1.

Активный элемент (АЭ), изготовленный из монокристалла Cr<sup>2+</sup>:CdSe, помещался в центр близкого к концентрическому резонатора, образованного глухим зеркалом 31 с радиусом кривизны 100 мм и выходным зеркалом 32



Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

с радиусом кривизны 50 мм. Глухое зеркало имело 99 % пропускания на длине волны накачки и близкое к 100 % отражение в диапазоне длин волн 2,6 – 3,0 мкм. Использовался набор из трех выходных зеркал, имеющих коэффициенты пропускания 9,5 %, 21,5 % и 33,3 % на длине волны 2,65 мкм. АЭ имел длину 4 мм и поперечные размеры 2 × 8 мм. Кристалл зажимался через прослойки из индиевой фольги в медный теплоотвод, охлаждаемый проточной водой до температуры 11,5 °С. АЭ располагался по нормали к оптической оси. Рабочие грани кристалла не имели просветляющих покрытий, что приводило к потере около 18 % мощности накачки.

Накачка Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера осуществлялась с помощью тулиевого волоконного лазера с длиной волны 1,908 мкм и максимальной мощность 20 Вт (TLM-20, "ИРЭ-Полюс"). Для согласования мод накачки и генерации, излучение тулиевого лазера фокусировалось на кристалл линзой Л1 с фокусным расстоянием 77,9 мм. Расходящийся выходной пучок фокусировался линзой Л2, имеющей фокусное расстояние 100 мм. Для фильтрации генерируемого лазером излучения от излучения накачки использовались селективные зеркала 33 и 34, имеющие коэффициенты пропускания на длине волны накачки 94,7 % и 39,6 %, соответственно. Выходная мощность лазера регистрировалась тепловым датчиком мощности (30(150)А-ВВ-18, «Ophir Photonics»).

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 2 представлены зависимости выходной мощности Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера от поглощенной мощности накачки для трёх различных выходных зеркал, пороговые поглощенные мощности накачки получены экстраполяцией этих зависимостей как показано на рисунке 3. Максимальное значение выходной мощности 1,06 Вт и дифференциальный КПД 41,6 % были получены при использовании выходного зеркала с коэффициентом пропускания 33,3 %. Пороговая поглощенная мощность накачки при этом составила 0,256 Вт.

Использование зеркала с меньшим коэффициентом пропусканием 21,5 % дало сниже-



Зависимости выходной мощности Cr<sup>2+</sup>:CdSeлазера от поглощенной мощности накачки



Рисунок 3. Зависимости выходной мощности Cr<sup>2+</sup>:CdSeлазера от поглощенной мощности накачки

ние КПД до 34,4 % при пороговой мощности 0,201 Вт, при дальнейшем снижении пропускания до 9,5% получен КДП 32,9 % и пороговая мощность 0,145 Вт.

Для оценки уровня внутренних потерь δ в резонаторе, необходимо построить зависимость пороговой поглощенной мощности накачки *P*<sub>th</sub> от логарифмических потерь на выходном зеркале In (1/*R*), которая, согласно [6], является линейной:

$$P_{th} = P_{mth} \left( 1 + \frac{\ln(1/R)}{2\delta L} \right)$$

где – *P<sub>mth</sub>* минимальная пороговая мощность накачки при отсутствии связи на выходе, *L* – длина активного элемента, *R* = 1 – *T* – коэффициент отражения выходного зеркала.



Рисунок 4. Пороговая мощность накачки в зависимости от потерь на выходном зеркале

Из аппроксимации экспериментальных данных на рисунке 4 можно определить, что  $P_{mth}$  составляет 0,1 Вт, а полные потери за проход  $2\delta L = 0,3$ .

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе продемонстрирована непрерывная генерация Cr<sup>2+</sup>:CdSe-лазера. Накачка осуществлялась тулиевым волоконным лазером на длине волны 1,908 мкм. Рассмотрена работа лазера с тремя выходными зеркалами, имеющими разные коэффициенты пропускания. Внутренние потери в кристалле составили . Получена выходная мощность 1,06 Вт при поглощенной мощности накачки 2,6 Вт с дифференциальным КПД 41,6 % при использовании выходного зеркала с коэффициентом пропускания 33,3 %.

Дальнейшие исследования предполагают реализацию перестройки длины волны лазера с использованием фильтра Лио, а также увеличение выходной мощности за счет дальнейшей оптимизации выходного зеркала резонатора.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20431).

#### Список литературы:

1. Mikhail K. Tarabrin, Vladimir A. Lasarev, Sergey M. Tomilov, Valery E. Karasik, Valery V. Tuchin, "Broadband tunable mid-IR Cr2+:CdSe lasers for medical applications", Proc. SPIE 10717, Saratov Fall Meeting 2017: Laser Physics and Photonics XVIII; and Computational Biophysics and Analysis of Biomedical Data IV, 1071707 (26 April 2018); doi: 10.1117/12.2315035; https://doi. org/10.1117/12.2315035

2. *J. McKay, K. L. Schepler, and G. Catella*, "Broadly tuned, all-solid-state Cr<sup>2+</sup>:CdSe mid-IR laser," in Conference on Lasers and Electro-Optics, C. Chang-Hasnain, W. Knox, J. Kafka, and K. Vahala, eds., OSA Technical Digest (Optical Society of America, 1999), paper CFJ1.

3. В. И. Козловский, Ю. В. Коростелин, А. И. Ландман, Ю. П. Подмарьков, Я. К. Скасырский, М. П. Фролов, "Непрерывный Cr<sup>2+</sup>:CdS-лазер", Квантовая электроника, 40:1 (2010), 7–10 [Quantum Electron., 40:1 (2010), 7–10]

4. *R. H. Page, J. A. Skidmore, K. I. Schaffers, R. J. Beach, S. A. Payne, and W. F. Krupke*, «Diode pumping and wide IR tunability of ZnSe:Cr<sup>2+</sup> lasers," in Conference on Lasers and Electro-Optics, D. Killinger, G. Valley, C. Chang-Hasnain, and W. Knox, eds., Vol. 11 of OSA Technical Digest (Optical Society of America, 1997), paper CThT6.

5. Lazarev, Vladimir & Tarabrin, Mikhail & A Kovtun, A & Karasik, V.E. & N Kireev, A & Kozlovsky, Vladimir & V Korostelin, Yu & P Podmar'kov, Yu & Frolov, Mikhail & Gubin, M. (2015). Continuous-wave broadly tunable diode laser array-pumped mid-infrared Cr<sup>2+</sup> :CdSe laser. Laser Physics Letters. 12. 125003. 10.1088/1612-2011/12/12/125003.

6. *Findlay, D., Clay, R.A.*, "The measurement of internal losses in 4-level lasers," Phys. Lett., 20, 277 (1966)



# ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД НА БАЗЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ND<sup>3+</sup>:YAG ЛАЗЕРА С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ НАКАЧКИ И ГЕОМЕТРИЕЙ РЕЗОНАТОРА

ВЕРБИЦКИЙ А.В., ЯНЕВ А.С., ЛАЗАРЕВ В.А., ВЕРЕНИКИНА Н.М.

### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: verbitskiy1995@gmail.com, alexandr.yanev@gmail.com

**Аннотация:** В рамках программы по созданию нового комплекса лабораторных работ на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» (РЛ-2) спроектирован и создан макет твердотельного лазера с ламповой накачкой, а также предложен новый подход к проведению практических занятий для студентов на примере разработанного лабораторного стенда на базе твердотельного Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера с изменяющимися параметрами накачки и геометрией резонатора.

Ключевые слова: Nd<sup>3+</sup>:YAG лазер, лабораторный стенд, практические занятия, ламповая накачка.

# LABORATORY BENCH BASED ON SOLID-STATE ND<sup>3+</sup>: YAG LASER WITH VARYING PUMP PARAMETERS AND CAVITY GEOMETRY

VERBITSKII A.V., YANEV A. S, LAZAREV V.A., VERENIKINA N.M.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: verbitskiy1995@gmail.com, alexandr.yanev@gmail.com

**Abstract:** Within the framework of the program for the creation of a new set of laboratory works, a model of a solid-state laser with lamp pumping was designed and created at the Chair « Laser and Optoelectronics systems» (RL-2), and a new approach to practical studies for students was proposed, using the example of a developed laboratory bench based on a solid Nd<sup>3+</sup>: YAG laser with varying pump parameters and cavity geometry.

Keywords: Nd<sup>3+</sup>: YAG laser, laboratory bench, practical studies, lamp pumping.

#### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня в связи с принятием Стратегии научно-технологического развития России растёт потребность государства в специалистах, готовых к продуктивной инновационной деятельности в быстроизменяющихся условиях. Актуальность формирования профессиональных и особенно ключевых компетенций обусловлена необходимостью расширения профессионального признания, сопоставимости и совместимости дипломов и квалификаций [1]. Для этого профессиональное образование и технология его реализации должны формировать у будущих специалистов зону ближайшего развития, позволяющую им не только адаптироваться и утвердиться в своей профессии, но и формировать готовность к постоянному совершенствованию [2].

Ориентация на новые цели образования – компетенции – требует не только изменения содержания изучаемых предметов, но и методов и форм организации образовательного процесса, активизацию деятельности обучающихся в ходе занятия, приближения изучаемых тем к реальной жизни и поисков путей решения возникающих проблем [1].

Один из таких методов – новый подход к организации лабораторных работ, который заключается в разработке нового лабораторного стенда малой группой студентов. После создания стенда и разработки методических материалов эта группа с участием преподавателя проводит лабораторную работу для студентов всего потока. Основной задачей такого подхода является формирование наиболее эффективных условий для выработки у студентов нового технического мышления, готовности к самостоятельному освоению техники и технологий, а также активному участию студентов в образовательном процессе [2].

## УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД НА БАЗЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ND<sup>3+</sup>:YAG ЛАЗЕРА

Для проверки возможности реализации данного подхода и учёта всех возможных трудностей при использовании его в образовательном процессе разработан новый учебнолабораторный стенд на базе твердотельного Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера с изменяющимися параметрами накачки и геометрией резонатора.

Для выполнения требований безопасности при работе с лазерной установкой спроектирован защитный каркас с панелями из органического стекла, покрытыми специальной пленкой на основе чернёной алюминиевой фольги (Thorlabs BKF12), которая поглощает излучение в спектральном диапазоне работы лазера и системы накачки. Также в ходе подготовительных работ подобраны защитные очки (Thorlabs LG9) с оптической плотностью 5 в спектральном диапазоне 720 – 1090 нм.

На следующем этапе произведён теоретический расчёт резонатора твердотельного Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера и спроектирована конструкция лазера на базе оптической скамьи. На основе разработанной конструкции лазера составлен перечень покупных изделий-комплектующих, а также перечень вновь разрабатываемых деталей и узлов.

При проектировании лабораторного стенда использован модульный подход, положительно зарекомендовавший себя в образовательной практике [2]. Реализованная схема учебно-лабораторного стенда на базе твердотельного Nd<sup>3+</sup>:YAG лазера представлена на рис. 1.

Модульность лабораторного стенда обеспечивается его построением на базе оптической скамьи, что даёт возможность легко вносить изменения в его конструкцию и анализировать, как это влияет на параметры и характеристики выходного лазерного излучения [3]

После сборки лазера и получения стабильной генерации разработана измерительная схема, которая позволяет определять зависимость выходной мощности от мощности накачки, КПД лазера, длительность лазерного импульса, длительность импульса лампы-вспышки, которая используется для накачки твердотельной активной среды, энергетический профиль пучка. Набор специально изготовленных диафрагм позволяет проводить селекцию основной поперечной моды лазера [4].

В дальнейшем в данном лабораторном стенде планируется реализовать и исследовать режимы модуляции добротности и внутрирезонаторной генерации второй оптической гармоники [4], а также создать программу для моделирования процессов лазерной динамики для сравнения их с экспериментальными данными.





Новый подход к лабораторным работам позволяет формировать и развивать у студентов такие качества, как самостоятельность, ответственность за принятие решений; познавательная, творческая, коммуникативная, личностная активность, определяющие поведенческие качества компетентного специалиста [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условия обучения, реализованные в новом подходе к проведению лабораторных работ, позволяют обеспечить максимальную активность самих студентов в процессе формирования ключевых навыков, так как последние формируются лишь в ходе самостоятельной работы [1].

В новом подходе реализован один из методов интерактивного обучения, а именно метод проектных команд. Этот метод можно рассматривать как одну из личностно-ориентированных развивающих технологий, в основе которой положена идея развития познавательных навыков учащихся, творческой инициативы, умения самостоятельно мыслить, находить и решать проблемы, ориентироваться в информационном пространстве, умения прогнозировать и оценивать результаты собственной деятельности [1].

В ходе создания лабораторного стенда обучающийся оказывается вовлеченным в активный познавательный и созидательный творческий процесс; при этом происходит как закрепление имеющихся знаний по предмету, так и получение новых знаний (гарвардская система обучения [5]). Кроме того, формируются надпредметные компетенции: исследовательские (поисковые), коммуникативные, организационно-управленческие, рефлексивные, умения и навыки работы в команде и др. [1].

## Список литературы:

1. Двуличанская Н.Н. Интерактивные методы обучения как средство формирования ключевых компетенций // Наука и образование /электронный журнал. 2011. №4.

2. Минаев Н., Вострухин А., Вахтина Е., Ушкур Д.. Создание лабораторной базы опережающего обучения // Высшее образование в России. 2008. №9. С. 10-14.

3. Рожков О.В., Щербаков А.Н., Пахомов И.И. Исследование зависимости параметров лазерного излучения от геометрии резонатора. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. NN с.

4. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. - М.: Радио и связь, 1982. С. 255-287.

5. Crouch C. H., Mazur E. Peer instruction: Ten years of experience and results // American journal of physics. 2001. Vol. 69(9). P. 970-977.

References

[1]. Dvulichanskaya. N.N. Interactive methods of teaching as a means of forming key competences, electronic journal Science and Education of the Bauman MSTU Vol. 4, 2011.

[2]. Minaev N., Vostrukhin A., Vakhtina E., Ushkur D.. Creation of a laboratory basis for advanced training, The journal Higher education in Russia Vol. 9, 2008. p. 10-14.

[3]. Rozhkov O.V.,. Scherbakov A.N, Pakhomov I.I.. Investigation of the laser radiation parameters dependence on the cavity geometry. – M.: Bauman MSTU, 2004.

[4]. Pakhomov I.I., Rozhkov O.V., Rozhdestvin V.N.. Optoelectronic Quantum Devices: A Textbook for Institutions of Higher Education, Radio i Svyaz', Moscow, 1982. p. 255-287.

[5] Crouch C. H., Mazur E.. Peer instruction: Ten years of experience and results. American journal of physics, Vol. 69(9), 2001, p. 970-977.

# О НОРМИРОВКАХ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРВОГО И ВТОРОГО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ ПРИ РАСЧЁТЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ АБЕРРАЦИЙ ЗЕЙДЕЛЯ В ПРОГРАММАХ OPAL, OSLO, Zemax

## СУШКОВ А.Л.

### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: ale-sushkov@yandex.ru

**Аннотация:** Широкое применение зарубежных программ проектирования однородных и градиентных оптических систем в части анализа аберраций третьего порядков часто затруднено по причине несовпадения результатов расчёта коэффициентов аберраций, вычисленных по отечественным и иностранным программам. Проведённый анализ позволил установить связь между результатами расчёта коэффициентов аберраций в современных программах анализа и синтеза оптических систем.

Ключевые слова: оптическая система, аберрации 3 – го порядка, коэффициенты аберраций 3 – го порядка, нормировка коэффициентов аберраций.

**Сокращения:** ОС – оптическая система, РПП – распределение показателя преломления, ППП – пакет прикладных программ.

В отечественной и зарубежной литературе [1, 2, 4, 5, 6] выражения аберрационных составляющих третьего порядка Δ*y*` и Δ*x*` ОС осевой симметрии часто приводят в полярных зрачковых координатах ρ и Θ. Эти выражения имеют общий вид для однородной и градиентной ОС:

$$\Delta y'_{III} = \sigma_1 \rho^3 \cos \Theta + \sigma_2 \rho^2 h (2 + \cos 2\Theta) + (3\sigma_3 + \sigma_4) \rho h^2 \cos \Theta + \sigma_5 h^3$$
$$\Delta x'_{III} = \sigma_1 \rho^3 \sin \Theta + \sigma_2 \rho^2 h \sin 2\Theta + (\sigma_3 + \sigma_4) \rho h^2 \sin \Theta$$
(1)

где *h* – нормированная высота объекта,  $\rho$ ,  $\Theta$  – нормированные полярные координаты на входном зрачке,  $\sigma_{1+5}$  – коэффициенты аберраций 3 – го порядка: сферической аберрации, комы, астигматизма, кривизны Петцваля, дисторсии. В зарубежной литературе применяются также обозначения коэффициентов аберраций: SA3, CMA3, AST3, PTZ3, DIS3. В отечественной литературе закрепились обозначения:  $S_{\mu}S_{\mu\nu}S_{\mu\nu}S_{\nu\nu}$ .

Единственным отличием является изменение вида формул, по которым нужно вычислять коэффициенты  $\sigma_i$ .

Выражения для коэффициентов имеют вид [2]:

$$\sigma_{i} = \eta \left( \sum_{j=1}^{p} a_{ij} + \sum_{j=1}^{p} a_{ij}^{*} \right)$$
(2)

где  $a_{ij}$  – вклад, обусловленный наличием поверхности раздела двух граничащих сред;  $a_{ij}^*$  – вклад, обусловленный неоднородностью среды, называемый вкладом переноса,  $\eta$  – нормировочный коэффициент:

$$\eta = -\frac{1}{n p' a p} \tag{3}$$

 $v'_{ap}$  – угол первого вспомогательного луча в пространстве изображений, *i* – индекс коэффициента аберрации *i* = (1-5); *j* – индекс поверхности *j* = (1-*p*), *p* – индекс оптической среды пространства изображений.

В общем случае функция РПП оптической среды представляется обычно в виде степенного ряда:

$$n(z, y) = n_0(z) + n_1(z)y^2 + n_2(z)y^4 + \dots,$$

где  $n_0(z) n_1(z) n_2(z) n_1(z)$ ,  $n_0(z)$ ,  $n_1(z)$ ,  $n_2(z)$  также представляют собой степенные ряды:

$$n_0(z) = n_{00} + n_{01}z + n_{02}z^2,$$
  

$$n_1(z) = n_{10} + n_{11}z + n_{12}z^2,$$
  

$$n_2(z) = n_{20} + n_{21}z + n_{22}z^2.$$

Выражения для вкладов поверхности  $a_i$  и среды  $a^*_i$  имеют вид:

 $q = \frac{{}^{l}b}{{}^{l}a}, \quad \tilde{a} = \frac{1}{2}n_0(\frac{n_0}{n_0} - 1)y_a{}^{l}a^2({}^{l}a + v_a{}^{'}),$ 

$$a_{1} = \widetilde{a} + Ky_{a}^{4}$$

$$a_{2} = q\widetilde{a} + Ky_{a}^{3}y_{b}$$

$$a_{3} = q^{2}\widetilde{a} + Ky_{a}^{2}y_{b}^{2}$$

$$a_{4} = \frac{1}{2}\lambda^{2}C\Delta\left(\frac{1}{n_{0}}\right)$$

$$a_{5} = q^{3}\widetilde{a} + qa_{4} + Ky_{a}y_{b}^{3},$$
(4)

где

λ – параксиальный инвариант Лагранжа-Гельмгольца; *i<sub>a</sub>*, *i<sub>b</sub>* – углы с нормалью к поверхности в точке падения первого и второго вспомогательных лучей; *C* – кривизна поверхности. К – коэффициент, учитывающий неоднородную природу граничащих сред, носящий название поверхностный коэффициент неоднородной среды.

Покажем, что от записи коэффициента  $\tilde{a}$  через параметры  $y_a$ ,  $i_a$ ,  $v'_a$  можно перейти к записи через  $v_a$ ,  $v'_a$ ,  $y_a$ , то есть перейдем к параметрам  $\alpha$ , h первого вспомогательного луча, принятым в отечественной литературе по теории аберраций 3 – го порядка при расчёте коэффициентов аберраций  $S_1...S_v$ .

Имеем

$$\widetilde{a} = \frac{1}{2}i_a^2 \cdot n_0 \cdot y_a \cdot \left(\frac{n_0}{n_0'} - 1\right) \cdot (i_a + v_a')$$
(5)

С учетом известной формулы [1]

$$i_a = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \mu} \frac{1}{n_0} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta \mu} \cdot \mu$$
 где  $\mu = \frac{1}{n_0}$ 

после несложных преобразований имеем:

$$\widetilde{a} = \frac{1}{2}i_a^2 n_0^2 y_a \varDelta(\alpha\mu) = \frac{1}{2} \left(\frac{\varDelta\alpha}{\varDelta\mu}\right)^2 \varDelta(\alpha\mu) y_a \tag{6}$$

В окончательном виде с учетом перехода к обозначению уа = h, для одной поверхности получим запись для  $\tilde{a}$  и нормировочного коэффициента  $\eta$ :

$$\widetilde{a} = \frac{1}{2}hP \quad \eta = -\frac{1}{n_p \alpha'_p}$$

где 
$$P = \left(\frac{\Delta \alpha}{\Delta \mu}\right)^2 \Delta(\alpha \mu)$$

Заметим, что поскольку коэффициент  $\tilde{a}$  равен (1/2)*hP*, то для перехода от  $a_1$  к принятому в отечественной литературе обозначению  $S_1$  необходимо учесть коэффициент 1/2.

Кроме того, как показывает анализ формул вычисления углов и высот параксиальных лучей [4,5], выражения для коэффициентов аберраций  $a_1$  записаны в системе координат, привязанной к предмету, что приводит к изменению знаков углов параксиальных лучей по сравнению с системой координат, принятой в классической теории аберраций ОС и привязанной к первой поверхности линзы.

Учет этого обстоятельства позволяет получить в окончательном виде выражения для коэффициентов аберраций 3-го с применением обозначений аберрационных параметров, принятых в отечественной литературе по теории аберраций третьего порядка, что позволяет рассчитывать значения аберраций 3-го порядка по формулам, приводимым в отечественной литературе.

В общепринятых обозначениях получаем [1, 3]:

$$S_{i} = \overline{S}_{i,k} + \widetilde{S}_{i,k} , \qquad (8)$$

где  $S_{i,k}$  – поверхностная составляющая *i* –го коэффициента аберрации на *к* – ой поверхности;  $\widetilde{S}_{i,k}$  – составляющая *к* – го перехода (после *к* – ой поверхности).

При суммировании поверхностных составляющих по поверхностям можно записать коэффициент S<sub>i</sub> как сумму

$$\begin{split} \bar{S}_{I} &= \sum_{k=1}^{n} (h_{k}P_{k} + K_{k}h_{k}^{4}) \\ \bar{S}_{II} &= \sum_{k=1}^{n} [h_{k}P_{k} \left(\frac{\delta\beta_{\kappa}}{\delta\alpha_{\kappa}}\right) + K_{k}h_{k}^{3}H_{k}J \\ \bar{S}_{III} &= \sum_{k=1}^{n} [h_{k}P_{k} \left(\frac{\delta\beta_{\kappa}}{\delta\alpha_{\kappa}}\right)^{2} + K_{k}h_{k}^{2}H_{k}^{2}J \\ \bar{S}_{IV} &= -\sum_{k=1}^{n} \frac{\delta\mu_{k}}{r_{k}} \\ \bar{S}_{V} &= \sum_{k=1}^{n} \{[h_{k}P_{k} \left(\frac{\delta\beta_{\kappa}}{\delta\alpha_{\kappa}}\right)^{2} + \frac{J^{2}}{h_{k}}\frac{\delta(\alpha_{\kappa}n_{\kappa})}{n_{k}n_{k}+1}J\frac{\delta\beta_{\kappa}}{\delta\alpha_{\kappa}} + K_{k}h_{k}H_{k}^{3}\} \\ K_{k} &= \frac{4\delta n_{10k}}{r_{k}} + \frac{\delta n_{01k}}{r_{k}^{2}} \qquad P_{k} = \left(\frac{\delta\alpha_{k}}{\delta\mu_{k}}\right)^{2}\delta\alpha_{\kappa}\mu_{k} \\ \delta\alpha_{\kappa} &= \alpha_{\kappa}' - \alpha_{\kappa}, \quad \delta\beta_{\kappa} = \beta_{\kappa}' - \beta_{\kappa}, \qquad J = -n_{1}(s_{1} - s_{p})\alpha_{1}\beta_{1}, \quad s_{1} \neq \infty \\ J &= -n_{1}h_{1}\beta_{1}, \quad s_{1} = \infty \end{split}$$

где:  $\alpha_k$ ,  $\beta_k$  – углы падения и преломления первого и второго вспомогательных лучей на  $\kappa$  – ой поверхности;  $h_k$ ,  $H_k$  – высоты первого и второго вспомогательных лучей на поверхности с радиусом кривизны  $r_k$ ; Выражения для  $\widetilde{S}_{i,k}$  в рамках данной работы не рассматриваются.

При расчётах коэффициентов аберраций величина коэффициента зависит от величин исходных α<sub>1</sub>, β<sub>1</sub>, h<sub>1</sub>, H<sub>1</sub>. Как показало изучение литературных источников и практика расчётов по программам OSLO и Zemax, особенностью этих программ является расположение системы координат в плоскости предмета. Данную систему координат называют базовой\* в противоположность к системе координат привязанной к поверхности линзы, называемой локальной системой координат.

Известны три типа нормировок исходных величин углов и высот.

#### Каноническая нормировка.

 $h_1=1, \alpha_1=0, \alpha_0=1, f=1, \beta_1=1, H_1=s_p/f$ ( при s = – ∞),  $h_1 = s_1 \alpha_1$ ,  $\alpha_1 = \beta_0$  где  $\beta_0$  – линейное увеличение (при s ≠ – ∞).  $\beta_1 = 1, H_1 = S_n$ 

### Естественная нормировка.

 $h_1 = m_{30} \quad \alpha_1 = 0$ (при s = -∞)  $h_1 = s_1 \alpha_1$ ,  $\alpha_1 = \beta_0$  где  $\beta_0$  – линейное увеличение.  $\beta_1$  = tg  $\omega$ , где  $\omega$  – угол поля в пространстве предметов (при s ≠ – ∞).

### Заданная нормировка

При s ≠ – ∞ задаётся произвольное значение α, и вычисляется h,.  $\beta_1 = y_1/(s_2 - s)$ 

При s =  $-\infty$  часто задают h<sub>1</sub>=f`, H<sub>1</sub>= s<sub>p</sub>,  $\beta_1$ =1.

Здесь у1 – высота предмета, s, s – расстояние до предмета и входного зрачка от первой поверхности системы, α<sub>1</sub>, β<sub>1</sub> – тангенс угла наклона с оптической осью осевого луча и главного луча, идущего через центр входного зрачка

\*) другие названия системы координат глобальная, система координат Федера.

из верхней точки предмета, h<sub>1</sub>,H<sub>1</sub> – высота на первой поверхности осевого и главного наклонного лучей.

В ППП OSLO и Zemax применяется естественная нормировка исходных параметров углов и высот в базовой системе координат, что неудобно для анализа и требует перевода полученных значений коэффициентов аберраций в каноническую нормировку, поскольку каноническая нормировка параметров лучей и полученных значений коэффициентов аберраций даёт объективную информацию об аберрациях третьего порядка ОС, что позволяет проводить сравнительный анализ.

Вначале рассмотрим переход из естественной нормировки в каноническую нормировку в ППП OPAL [6]. Пересчёт проводится по формулам (изображение в воздухе, n'<sub>p</sub>=1):

$$S_{Ik} = \frac{S_{1E}}{\alpha'_{p}^{4} \cdot f'} \quad S_{IIk} = \frac{S_{IIE}}{\alpha'_{p}^{3} \cdot f' \cdot \beta_{1}} \quad S_{IIIk} = \frac{S_{IIIE}}{\alpha'_{p}^{2} \cdot f' \cdot \beta_{1}^{2}} \quad S_{IV4k} = S_{IVE} \cdot f'$$

$$S_{Vk} = \frac{S_{VE}}{\alpha'_{p} \cdot f' \cdot \beta_{1}^{3}} \quad (10)$$

Для пересчёта коэффициентов аберраций, рассчитанных по программе OSLO в естественную нормировку OPAL согласно (3) и (7) имеем следующие соотношения (знак  $\alpha'_{p}$  из OSLO) :

$$S_{IE} = SA3 \cdot 2 \cdot \alpha'_{p} \quad S_{IIE} = CMA3 \cdot 2 \cdot \alpha'_{p} \quad S_{IIIE} = AST3 \cdot 2 \cdot \alpha'_{p}$$

$$S_{IVE} = PTZ3 \cdot 2 \cdot \alpha'_{p} \cdot \frac{1}{J^{2}} \quad S_{VE} = DIS3 \cdot 2 \cdot \alpha'_{p}.$$
(11)

Здесь:  $\alpha'_p$  – угол первого вспомогательного луча в пространстве изображений, *J* – параксиальный инвариант Лагранжа-Гельмгольца.

При применении формул (11) используются результаты расчётов коэффициентов аберраций, параксиального инварианта *J*, угла α в пространстве изображений, приводимые в разделе PAR-AXIAL TRASE программы OSLO.

Для перехода из естественной нормировки параметров первого и второго вспомогательных лучей, принятой в OSLO, в каноническую нормировку OPAL, следует воспользоваться соотношениями:

$$S_{Ik} = \frac{2 \cdot SA3}{\alpha'_p^3 \cdot f'}, \quad S_{IIk} = \frac{2 \cdot \tilde{N}MA3}{\alpha'_p^2 \cdot f' \cdot \beta_1}, \quad S_{IIIk} = \frac{2 \cdot AST3}{\alpha'_p \cdot f' \cdot \beta_1^2},$$

$$S_{IVk} = 2 \cdot \frac{1}{I^2} \cdot PTZ3 \cdot \alpha'_p \cdot f' \quad S_{Vk} = \frac{2 \cdot DIS3}{f' \cdot \beta_1^3}.$$
(12)

**Пример**. Расчёт коэффициентов аберраций по ППП OPAL, OSLO, ZEMAX,

Объектив "Триплет" f`=10мм, F`/2.8, 2ω=40°, s`<sub>f</sub>`=8.17мм

R <sub>1</sub> =4.952	0.7	LAK33 1.753	977
R <sub>2</sub> =109.4	1.2	AIR	
$R_3 = -6.426$	0.3	SF1	1.71736
R <sub>4</sub> =4.952	1.1	AIR	
R <sub>5</sub> =25.022	0.7	LAK33 1.753	977
$R_6 = -4.952$		AIR	

Апертурная диафрагма расположена на поверхности 4.

 $m_{_{3D}}$ = 1.785мм, у `= - 3.64мм .  $\omega$  =20°

Расчет коэффициентов аберраций 3 – го порядка в ППП OPAL дает следующие значения коэффициентов: в естественной нормировке параметров вспомогательных лучей:  $S_i = 0.01332$ ,  $S_{ii} = 0.00020$ ,  $S_{iii} = -0.00367$ ,  $S_{iv} = 0.03751$ ,  $S_v = 0.00127$ . (h<sub>1</sub>=1.7857,  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_{b}^* = 0.1786$ );

в канонической нормировке :  $S_{lk}$  =1.31306  $S_{llk}$  = 0.00983  $S_{llk}$  = -0.08693  $S_{lVk}$  = 0.37506  $S_{Vk}$  = 0.01475 ( h<sub>1</sub>=1,  $\alpha_1$  = 0,  $\alpha_p$  =1)

В табл.1 приведены результаты расчёта коэффициентов Зейделя по программе OSLO в естественной нормировке параметров первого и второго вспомогательных лучей, α`p = α<sub>7</sub> <0, ω = - 20°. *Таблица* 1.

SA3	CMA3	AST3	PTZ3	DIS3	α`p	J
-0.03739	-0.00057	0.010282	-0.04436	-0.00355	-0.17858	0.649945

Пересчёт величин коэффициентов Зейделя, полученных в ППП OSLO, по формулам (2) в естественную нормировку OPAL даёт результаты, приведённые в табл. 2 (угол α`<sub>в</sub> >0): Таблица 2.

SA3 <sup>·</sup> 2 <sup>·</sup> α <sup>`</sup> <sub>p</sub>	SMA3 <sup>2</sup> a <sup>p</sup>	AST3 <sup>·</sup> 2 <sup>·</sup> α <sup>`</sup> <sub>p</sub>	$PTZ3^{2}\alpha_{p}/I^{2}$	DIS3 <sup>·</sup> 2 <sup>·</sup> a <sup>`</sup> p	α`p
0.013354	-0.0002039	-0.0036723	0.037509	-0.00127	0.17858

Сравнение результатов расчета по ППП OPAL при естественной нормировке исходных величин углов и высот и данных табл.2 показывает, что коэффициенты S<sub>II</sub> и S<sub>V</sub> изменили знак. Таким образом, коэффициенты аберраций S<sub>I</sub>, S<sub>III</sub>, S<sub>IV</sub>, рассчитанные в ППП OSLO могут быть использованы для расчета аберраций 3-го порядка по принятым в нашей литературе формулам, а для коэффициентов S<sub>II</sub> и S<sub>V</sub> надо изменить знак.

В табл. 3 приведены результаты расчёта коэффициентов аберраций в ППП Zemax при естественной нормировке исходных величин углов и высот, приводимые в разделе программы Analisys Aberration Coefficients.

#### Таблица 3.

$S_I$	$S_{II}$	S <sub>III</sub>	$S_{IV}$	$S_V$	α`p	J	
0.013354	-0.00020	-0.00367	0.015845	-0.0012	-0.17858	-0.649945	

Сравнение данных таблицы 3 с полученными в ППП OPAL значениями показывает, что коэффициенты S<sub>II</sub> и S<sub>v</sub> изменили знак. Для коэффициента S<sub>Iv</sub> следует провести пересчет по формуле S<sub>IVOPAL</sub> = S<sub>IVZEMAX</sub>/J2<sub>v</sub> что согласуется с формулой для S<sub>Iv</sub> из (1).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов расчета коэффициентов аберраций Зейделя позволяет использовать ППП OSLO и ZEMAX для изучения первичных аберрационных свойств OC, содержащих как традиционные однородные элементы, так и элементы с различными типами неоднородного показателя преломления. Расчет аберрации 3-го порядка следует проводить по формулам, приводимым в отечественной научно-технической литературе с учетом изменения знака у коэффициентов S<sub>II</sub> и S<sub>V</sub>.

#### Список литературы:

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. –Л.: Машиностроение, 1969, с.670.

2. Сушков А.Л. Монохроматические аберрации граданов как базовых элементов жестких эндоскопов: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. –44.с.:ил.

3. Сушков А.Л. Алгоритм расчёта зейделевых аберраций для оптической среды с распределенным показателем преломления. // Известия ВУЗов: Приборостроение. N5.-T.55. – 2012, с.64 – 72.

- 4. Инструкция к ППП OSLO.
- 5. Инструкция к ППП ZEMAX.
- 6. Инструкция к ППП OPAL.

# МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМЫ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИБОРАМИ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКОВ ВОЛНОВОГО ФРОНТА

## БАРЫШНИКОВ Н.В., ЖИВОТОВСКИЙ И.В., КАРАСИК В.Е., САХАРОВ А.А.

#### Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

E-mail: baryshnikov@bmstu.ru, karassik@bmstu.ru, smx@bmstu.ru

**Аннотация:** Проведен анализ недостатков традиционных систем измерения радиусов кривизн оптических деталей и предложено решение, позволяющее обойти указанные несовершенства. Изложена методика измерения радиусов кривизн зеркал больших диаметров прибором на основе датчика волнового фронта. Приведено теоретическое обоснование методики измерений. Рассмотрены результаты измерения по приведенной методике макетным образцом прибора, изготовленным авторами.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, измерение радиуса кривизны, методика измерений.

В настоящее время для контроля формы оптических деталей и определения фокусного расстояния зеркал в основном используют интерференционные приборы. Однако они имеют ряд существенных недостатков, которые усложняют эксплуатацию прибора и делают дорогим его производство. К таким недостаткам стоит отнести необходимость использования высокоточного эталона, требование источника с большой длиной когерентности (для контроля крупногабаритных деталей), чувствительность к вибрациям.

Перечисленные недостатки отсутствуют в случае использования приборов на основе датчиков волнового фронта (ДВФ), к достоинствам которых следует отнести отсутствие требований к когерентности источника и ис-



Рисунок 1. Принцип действия ДВФ Шака-Гартмана

пользовании высокоточного эталона, а также большой динамический диапазон (200-500λ), позволяющий использовать одну и ту же оптическую схему для широкого спектра измеряемых оптических деталей.

Принцип действия датчика волнового фронта типа Шака-Гартмана основан на измерении локальных наклонов волнового фронта (рис. 1), которые пропорциональны локальным смещениям фокальных пятен [1, 2], а одним из методов восстановления параметров волнового фронта является модальный метод, позволяющий получить описание волнового фронта как набор полиномов Цернике.

Главными элементами датчика являются приемник ПЗС или КМОП камеры и линзовый растр. Линзовый растр представляет собой матрицу микролинз, которые разбивают приходящий волновой фронт на локальные участки, фокусирующиеся затем на приемнике. На приемнике формируется изображение, называемое гартманограммой. Пример гартманограммы показан на рис. 2.

Готовые приборы с такими датчиками выпускают отечественные и зарубежные фирмы. На сегодняшний день это «Imagine Optics», «Trioptics», «Thorlabs», «Trioptics», «Visionica» и другие фирмы.

Например, фирма «Imagine Optics» произ-



Рисунок 2. Пример гартманограммы



Рисунок 3. Датчик фирмы «Imagine Optics»



Рисунок 4. Датчик фирмы фирмы «Visionica»



Рисунок 5. Датчик Фирма «Trioptics»

водит приборы на основе ДВФ со своей оптической системой (рис. 3), которая позволяет проводить анализ волнового фронта светового пучка, диаметр которого находится в пределах от 4,5 до 15 мм.

Такая система спроектирована для контроля формы поверхностей объективов телескопов типа Кассегрена-Шмидта с диаметрами до 250 мм, обеспечивая точность измерения λ/150 rms.

Аналогичные приборы выпускает и фирма «Visionica». Ее система ShaH 3020 включает оптическую систему диаметром 30 мм, благодаря чему чувствительность такого датчика по наклону волнового фронта составляет 0,05 мкрад. Абсолютная точность измерения составляет λ/100 rms. Внешний вид системы представлен на рисунке 4.

Фирма «Trioptics» [3] выпускает целую серию приборов на основе датчиков волнового фронта, в том числе предназначенных для измерения радиусов кривизн оптических деталей рис. 5.

У этого прибора имеется вертикальная подвижка с возможностью перемещения на 80 мм, что дает возможность измерения радиуса кривизны оптических деталей лишь в этих пределах, поскольку он использует ДВФ только для определения двух положений относительно измеряемой поверхности (самой поверхности и центра ее кривизны). Диаметр измеряемых оптических компонентов, измеренных с помощью прибора «Trioptics» не превышает 25 мм.

Схема такого прибора (WaveMaster CompactReflex фирмы «Trioptics»), который позиционируется как средство измерения радиусов кривизн оптических поверхностей приведена на рис. 6.

Здесь тестируемая поверхность освещается параллельным пучком в случае плоской или слабоизогнутой поверхности детали и сходящимся пучком в случае сильновыпуклой поверхности.

Из-за особенностей хода луча в приборе (параллельный пучок освещает контролируемую деталь и возвращается на ДВФ), такая схема не позволяет измерять оптические детали с диаметром, превышающим диаметр сенсора датчика волнового фронта.



Рисунок 6. Схема работы датчика фирмы «Trioptics

В самом деле, если в качестве источника излучения выбран коллимированный пучок с диаметром, равным диаметру ДВФ, то такая схема позволяет измерить радиус кривизны поверхности благодаря возможностям ДВФ по измерению параметров отраженного волнового фронта и сделать прибор компактным за счет отсутствия оптической системы, но не дает возможности измерять оптические детали больших диаметров. В случае определения малых радиусов кривизн поверхностей в схеме используется дополнительный оптический элемент (названный осветительной линзой - «Illuminating lens» в первой части рис. 6), который вносит заметный вклад в погрешность измерения радиуса кривизны волнового фронта датчиком, а определение радиуса кривизны оптической поверхности проводиться путем измерения перемещения прибора между положением, в котором фокус «Illuminating lens» совпадает с тестируемой поверхностью, и положением, в котором фокус «Illuminating lens» совпадает с центром ее кривизны.

Основным недостатком рассмотренных схем является невозможность измерения больших радиусов кривизны при значительных апертурах. Устранить это ограничение можно, создав прибор, в основе которого лежит методика расчета фокусного расстояния сферического зеркала, а следовательно, и его радиуса кривизны, в котором с помощью ДВФ определяется радиус кривизны волнового фронта преобразованного измеряемым зеркалом от точечного источника, расположенного на некотором расстоянии от его фокуса по формуле Гаусса (формуле отрезков). Аналогичная методика использовалась в [1] для определения фокусного расстояния линзы. Суть ее можно пояснить схемой на рис. 7.

Точечный источник S, роль которого играет полупроводниковый лазер с одномодовым волокном, помещают на некотором расстоянии от фокуса линзы z, тогда передним отрезком



Рисунок 7. Схема определения фокусного расстояния линзы

– будет сумма этого отрезка и фокусного расстояния линзы f, а изображение этого источника в соответствии с формулой отрезков для тонкой линзы будет находиться на расстоянии за главными плоскостями линзы. Зная связь между этими параметрами можно вычислить искомое фокусное расстояние:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f}$$

Величину *a*′ можно вычислить с помощью датчика волнового фронта исходя из следующих соображений:

$$a' = L + R$$

где R – радиус кривизны волнового фронта, измеряемый на расстоянии L от линзы.

Радиус кривизны волнового фронта определяется датчиком на основе полученного разложения этой поверхности по полиномам Цернике. Взяв за основу полином, называемый дефокусировка (C<sub>21</sub>), можно рассчитать и сам радиус:

$$R = -\frac{r^2}{4C_{21}}$$

где r – радиус апертуры датчика.

Очевидно, что из этих выражений не трудно найти искомый параметр *f*, задав положение источника и найдя радиус кривизны волнового фронта датчиком. Меняя положение источника излучения можно составить систему нескольких уравнений, из которых будет найдено усредненное значение фокусного расстояния линзы, например, методом наименьших квадратов. Вычисляя *f* по формуле отрезков, и сравнивая с полученным из экспериментальных данных значением, по наименьшему отклонению находится действительное значение *f*.

Таким образом, используя формулу отрезков для зеркального элемента, можно определить радиус его кривизны.

Для экспериментального исследования указанного метода, в МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан макет измерительной установки (рисунок 8), функциональная схема работы которого представлена на рисунке 9. Такая схема лишена многих из перечисленных недостатков. Значительный размер апертуры получается благодаря афокальной системе (компоненты 4 и 6) и позволяет выбирать гораздо большие фокусные расстояния для насадки, что благоприятно сказывается на точности прибора в целом.

Схема прибора (рис. 8) для измерения радиусов кривизн оптических деталей содержит лазер 1 с выходом на одномодовое волокно 2, который с оптической системой 4 позволяют получить плоский волновой фронт. Для увеличения апертуры прибора по сравнению с апертурой ДВФ 7 используется афокальная система (компоненты 4 и 6), а для создания точечного источника, перемещаемого относительно фокуса измеряемого зеркала 5 можно воспользоваться дополнительной оптической системой 8 (насадкой). В фокальной плоскости насадки формируется малоразмерное пятно, которое и будет точечным источником. Светоделитель 3 разделяет измерительную и осветительную ветви прибора.



Рисунок 8. Схема прибора для измерения радиусов кривизн оптических деталей

Расчет такой схемы показывает, что радиус кривизны волнового фронта на ДВФ (в плоскости линзового растра) *R*<sub>изм</sub> можно определить по следующей формуле:

$$R_{_{\mathcal{U}\mathcal{J}\mathcal{M}.}} = \frac{\left(f_{_{OK}}^{\prime}\right)^{2}}{f_{_{O\tilde{O}}}^{\prime}} - l \cdot \left(\frac{f_{_{OK}}^{\prime}}{f_{_{O\tilde{O}}}^{\prime}}\right)^{2} + \left(\frac{f_{_{OK}}^{\prime}}{f_{_{O\tilde{O}}}^{\prime}}\right)^{2} \cdot \left[f_{_{\mathcal{H}}}^{\prime} + \frac{\left(f_{_{\mathcal{H}}}^{\prime}\right)^{2} \cdot \left(f_{_{\mathcal{J}}} + \Delta\right)}{\Delta \cdot R_{_{\mathcal{J}}} + \Delta^{2}}\right]$$
(1)

где *f*<sub>ок</sub> – фокусное расстояние оптического компонента №2,

*f*<sub>об</sub> – фокусное расстояние оптического компонента №4,

 $f_{_{\rm u}}$  – фокусное расстояние насадки 8,

*R*<sub>3</sub> – радиус измеряемого зеркала 5,

∆ – смещение фокуса насадки 8 относительно центра кривизны зеркала 5 (на рис. 8 пока-

зано начальное положение прибора, где  $X_0 -$ расстояние, равное сумме заднего фокального отрезка элемента 8, смещения  $\Delta$  и радиуса кривизны зеркала 5 при  $\Delta$  = 0),

*I* – расстояние между насадкой и оптическим компонентом №4.

Из этого выражения можно найти искомый радиус кривизны тестируемого зеркала 5 *R*<sub>3</sub>:

$$R_{_{3ep}} = \frac{R_{_{\scriptscriptstyle USM}} \cdot (f_{_{o\delta}}')^2 \cdot \Delta^2 - f_{_{o\delta}}' \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta^2 + l \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta^2 - f_{_{\scriptscriptstyle H}}' \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta^2 - \Delta \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot (f_{_{\scriptscriptstyle H}}')^2}{R_{_{\scriptscriptstyle USM}} \cdot (f_{_{o\delta}}')^2 \cdot \Delta - f_{_{o\delta}}' \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta + l \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta - f_{_{\scriptscriptstyle H}}' \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot \Delta - 0, 5 \cdot (f_{_{o\kappa}}')^2 \cdot (f_{_{\scriptscriptstyle H}}')^2}$$
(2)

Погрешность измерения зависит в основном от погрешности изготовления оптических компонентов, погрешности сборки и юстировки прибора, причем последние будут определяться не только точностью контрольно-измерительных приборов, используемых при настройке прибора, но и точностью установочных механизмов компонентов самого прибора. Анализ выражения (2) позволяет получить сложную зависимость, которая может дать лишь приблизительную оценку точности определения *R*, поскольку в реальном приборе угловые рассогласования осей оптических компонентов вследствие эффекта Аббе приводят к дополнительному изменению дефокусировки, а следовательно, и к неточности определения R датчиком волнового фронта.

Также стоит отметить, что хотя современные ДВФ имеют погрешность восстановления волнового фронта порядка нескольких нанометров, на практике этого может оказаться недостаточно для точного определения  $R_3$  в указанной схеме при больших радиусах кривизн зеркал. Поэтому либо используемая методика измерений должна компенсировать такое положение, либо требуется ограничить диапазон измеряемых радиусов кривизн. В МГТУ им. Н.Э. Баумана по указанной схеме (рис. 8) был изготовлен макетный образец прибора, внешний вид которого представлен на рис. 9.

Макетный образец имел следующие параметры: f<sub>6</sub>=40 мм, f<sub>4</sub>=200 мм, f<sub>8</sub>=500 мм, - фокусы соответствующих оптических компонент и I=60 мм – расстояние между насадкой 8 и оптическим компонентом 4. Таким же постоянным коэффициентом являлся радиус кривизны волнового фронта, фиксируемый датчиком во время каждого измерения -  $R_2 = 651$  мм.



Рисунок 9. Фотография макетного образца



График результатов измерений

В ходе экспериментальных измерений были получены результаты, представленные на рис. 10. Результаты моделирования такой системы в параксиальном приближении представлены на рис. 11.

Построив полученную на основе приведенной формулы (1) кривую зависимости

$$\Delta = f(R_{2}), \tag{3}$$

на графике рис. 11, и сравнив ее с кривой, аппроксимирующей результаты измерений (рис. 10) можно увидеть, что они практически не отличаются друг от друга.

Из графика рис. 10 хорошо видно, что полученные экспериментальные значения очень хорошо соответствуют аппроксимационной кривой, что позволяет использовать ее для вычисления радиусов кривизн исследуемых зеркал.

При известных параметрах оптических компонентов указанная зависимость может быть записана в виде:

$$\Delta = a - ceR_3 + c\sqrt{h + e^2R_3^2} \quad (4)$$

где a, c, e и h – постоянные коэффициенты, характеризующие конструктивные параметры изготовленного прибора. Эта зависимость имеет вид формулы параксиального приближения (3), указанной выше, где постоянными коэффициентами являются конструктивные параметры оптической системы прибора (рис. 8). Однако, с учетом указанных погрешностей сборки и юстировки коэффициенты a, c, e и h необходимо уточнить исходя из результатов измерений зеркал известного радиуса.



Для разработанного прибора коэффициенты формулы (4) определены по результатам измерений зеркал известного радиуса, исходя из критерия наименьшего отклонения кривой от полученного в ходе измерений массива данных, что можно сделать, например, методом наименьших квадратов.

Такую зависимость будем называть «калибровочной кривой», на основе которой можно вычислить радиус кривизны исследуемого зеркала, измерив прибором величину смещения  $\Delta$ .

Для макетного образца, изготовленного в МГТУ им. Н.Э. Баумана (рис. 9) формула для «калибровочной кривой» будет иметь вид:

$$\Delta = -0.0074 - 0.5 \text{R}_3 + 0.0003 \sqrt{625.0 + 2.86 * 10^6 \text{R}_3^2}$$

где коэффициенты вычислялись на основе полученных результатов измерений в среде математического моделирования «Mathematica».

Таким образом, проведя измерения для нескольких зеркал известного радиуса и аппроксимировав полученные результаты зависимостью вида (3), получим «калибровочную кивую», с помощью которой можно найти соответствующий радиус *R*<sub>3</sub> исследуемого зеркала, измерив смещение ∆ для него.

В ходе лабораторных испытаний было проведено измерение радиусов кривизн эталонных зеркал со следующими радиусами: 174,99, 287,7, 328,074, 493,3, 816,8, 985,2, мм по методу «калибровочной кривой».

Результаты измерения, относительные и среднеквадратические (S  $_{\overline{\rm W}}$  =  $\frac{S_{{\rm R}_i}}{\sqrt{n}}$ ) погрешности приведены в табл. 1, где

Паспортный	Ролиния	Расчетный	Относительная	
радиус	Перемещения	радиус	погрешность	СКО
кривизны	А мм	кривизны	измерения радиуса	$S_{\overline{W}}$ , мм
зеркала R, мм	Δ, ΜΜ	зеркала R, мм	зеркала	
114,03	9,77	114.40	0.0011	0.002
174,99	9,262	175.36	0.0021	0.0014
287,7	8,873	287.11	0.002	0,001
328,074	8,796	327.76	0.0009	0.0011
493,3	8,613	492.31	0.0018	0.0018
816,8	8,467	817.89	0.0013	0.0016
985,2	8,429	987.47	0.0023	0.0013

# Таблица 1. Погрешности измерения радиусов зеркал

Δ<sub>wi</sub> – среднеквадратическое отклонение i-го перемещения прибора относительно измеряемого зеркала;

Δ<sub>w</sub> – среднеквадратическое отклонение усреднённого перемещения прибора относительно измеряемого зеркала;

Δ<sub>ΔWi</sub> – среднеквадратическое отклонение разности i-го и усреднённого перемещения прибора относительно измеряемого зеркала;

S<sub>Ri</sub> – оценка среднего квадратического отклонения результатов наблюдений, вычисляемая по формуле

$$S_{Ri} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta^2 \ell W_i}{n-1}};$$

S<sub>w</sub> – оценка среднеквадратического отклонения результата проверки;

n – количество измерений.

Из приведенной таблицы видно, что погрешность измерения радиуса кривизны составляет около 0.2%, т.е. прибор дает возможность точно измерять зеркала с радиусом кривизны по-

рядка 1 м. Анализ «калибровочной кривой» позволяет сделать вывод, что при погрешности измерения величины смещения ∆ 1 мкм можно с погрешностью менее 1% измерять радиусы кривизн зеркал 3-8 м.

Таким образом предложенное решение снимает ограничение на величину измеряемого радиуса кривизны, характерное для описанных в начале статьи методов. На указанный макетный образец был получен патент РФ №RU2623702.

# Список литературы:

1. Daniel R. Neal, James Copland, David A. Neal, Daniel M. Topa and Phillip Riera "Measurement of lens focal length using multi-curvature analysis of Shack-Hartmann wavefront data" *WaveFront Sciences, Inc.,* 14810 Central S.E., Albuquerque, NM 87123

2.*J.Ares, T.Mancebo, and S.Bará*, "Position and displacement sensing with Shack–Hartmann wave-front sensors," Appl. Opt. 39, 1511–1520 (2000).

3.http://www.trioptics.com/products/wavefrontsensors/compact-reflex

# АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АЛГОРИТМА АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

# МАРТЫНОВА Д.К., ГЛАДЫШЕВА Я.В. БАРЫШНИКОВ Н.В.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, г. Москва

**E-mail:** mart\_darya96@mail.ru

**Аннотация:** Разработан алгоритм абсолютной калибровки по методу двух плоскостей. Проведена оценка погрешностей работы алгоритма в низкочастотном и высокочастотном пространственных диапазонах.

**Ключевые слова:** контроль качества оптических поверхностей, методы абсолютной калибровки, метод двух плоскостей, восстановление профиля оптической поверхности.

# ACCURACY ANALYSIS OF THE ABSOLUTE CALIBRATION METHOD FOR HIGH-FREQUENCY DEFECTS

## MARTYNOVA D.K., GLADYSHEVA YA.V., BARYSHNIKOV N.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

E-mail: mart\_darya96@mail.ru

**Abstract:** An absolute calibration algorithm implementing the two-flat method has developed. The accuracy analysis has been performed for the algorithm in low-frequency and high-frequency spatial ranges.

**Keywords:** quality control of optical surfaces, absolute calibration methods, two-flat method, reconstruction of optical surface.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой интерес вызывают задачи по созданию высокотехнологичных оптико-электронных систем, таких как оптические и гравитационные телескопы [1], [2], а также сверхмощные лазерные установки [3]. В состав оптических схем таких систем входят крупногабаритные оптические детали, к качеству которых предъявляются строгие требования, поскольку их точность необходима для корректного функционирования всей системы. В связи с этим разработка методов контроля поверхностей оптических деталей является актуальной и перспективной научно-технической задачей.

Требования к качеству поверхностей крупногабаритных оптических элементов можно определить при помощи пространственно-частотных диапазонов поверхностных неоднородностей, каждый из которых характеризует определенный вид отклонений поверхности от теоретического профиля [3]. Каждому диа-

Диапазон	Ι	II	III	IV
Пространственный масштаб, мм	45033	332,5	2,50,12	0,120,01
Пространственная частота неоднородностей, мм <sup>-1</sup>	$2,5 \cdot 10^{-3} \dots 3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2} \dots 0,4$	0,48,3	8,3100
Контролируемый параметр неоднородности, нм	ΡV, λ	RMS	RMS	RMS
Допустимое значение контролируемого параметра, нм	0,33	1,80	1,10	0,40

Таблица 1. Классификация поверхностных неоднородностей

пазону соответствует определенный параметр качества (таблица 1), как: PV - максимальное расстояние между высотой наибольшего выступа и глубиной наибольшей впадины, а также RMS - среднеквадратическое отклонение профиля поверхности. Значения данных параметров в таблице 1 приведены, в качестве примера, из проекта по разработке активных сред для лазеров в национальном комплексе лазерных термоядерных реакций NIF [3].

Наиболее точным методом контроля качества оптических поверхностей является интерференционный метод. Поскольку стоит задача контроля крупногабаритных оптических деталей, то для измерений наиболее удобной является схема интерферометра Физо [4]. Однако существует ограничение, связанное с тем, что качество исследуемой детали сопоставимо с качеством эталона интерферометра, и для получения объективных результатов необходимо исключить ошибки поверхности эталона из измерений. Для решения данной задачи необходимо использовать абсолютную калибровку эталонной поверхности.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ

В большинстве случаев для исключения вклада эталонной поверхности из измерений используется метод трех плоскостей [5]. Классический метод заключается в попарном сравнении трех плоскопараллельных пластин A, B и C, где A - эталонная поверхность, а B и C - поверхности плоскопараллельных пластин.

Эти измерения можно представить как:

$$\begin{cases} m_1(x, y) = A(-x, y) + B(x, y), \\ m_2(x, y) = A(-x, y) + C(x, y), \\ m_3(x, y) = C(-x, y) + B(x, y), \end{cases}$$

где С (– x,y) – это плоскость, симметричная плоскости С (– x,y) относительно вертикальной оси, и это означает, что С-плоскость используется как пластина на проход.

Данная система из трех уравнений имеет четыре неизвестные, что не позволяет вычислить по отдельности профиль каждой из поверхностей. В связи с этим необходимо выполнение четвертого измерения, которое позволило бы решить данную систему. Таким образом, на основе принципа метода трех плоскостей было разработано несколько расширенных методик абсолютной калибровки.

Одним из примеров может служить метод, использующий представление поверхности в виде суммы четных и нечетных функций [6], [7]. В процессе измерения используется поворот измеряемой детали вокруг оптической оси, поэтому использовать его для крупногабаритных деталей сложно, кроме того при его реализации выполняется большое количество вычислений, что снижает точность восстановления профиля.

Другим примером по восстановлению профиля поверхности может служить метод, использующий в алгоритме разложение на полиномы Цернике [8]. Данный метод предполагает решение для каждого полинома поотдельности, поэтому он подходит для исследования только низкочастотных неоднородностей поверхности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИ-БРОВКИ ПО МЕТОДУ ДВУХ ПЛОСКОСТЕЙ

Единственным методом, позволяющим измерять исследуемую поверхность с требуемой точностью в широком пространственно-частотном диапазоне, является метод двух плоскостей [9]. При реализации метода, участвуют две поверхности: эталонная и исследуемая. Эталонная остается во время измерений неподвижной, а исследуемая перемещается при каждом измерении последовательно: влево, вправо, вверх и вниз (рис. 1):

$$\begin{pmatrix} m_{1}(x,y)\\ m_{2}(x,y)\\ m_{3}(x,y)\\ m_{4}(x,y) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_{ref}(x,y)\\ h_{test}\left(x + \frac{T_{1}}{2},y\right)\\ h_{test}\left(x - \frac{T_{1}}{2},y\right)\\ h_{test}\left(x,y + \frac{T_{1}}{2}\right)\\ h_{test}\left(x,y - \frac{T_{1}}{2}\right) \end{pmatrix}$$

где h<sub>ref</sub> (x,y) и h<sub>test</sub>(x,y) - это распределение высот эталонной и контролируемой поверхностей, соответственно.



Рисунок 1. Схема измерений для метода двух плоскостей

Посредством преобразования Фурье этих четырех измерений (m<sub>1</sub>(x,y)...m<sub>4</sub>(x,y)), можно вычислить поверхность контролируемой детали, без вклада эталона (1):

$$h_{\text{test}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{\left[ \mathcal{F}\{\text{Diff}_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\} \cdot \nu_{\mathbf{x}} + \mathcal{F}\{\text{Diff}_{\mathbf{y}}(\mathbf{x}, \mathbf{y})\} \cdot \nu_{\mathbf{y}} \right]}{2i\pi(\nu_{\mathbf{x}}^2 + \nu_{\mathbf{y}}^2)} \right\},\tag{1}$$

где Diff<sub>x</sub>(x,y) и Diff<sub>y</sub>(x,y) – разность двух горизонтальных и двух вертикальных измерений, соответственно, нормированная на *величину перемещения* Т; *v*<sub>x</sub>,v<sub>y</sub>- пространственные частоты, мм<sup>-1</sup>.

Точность данного метода ограничена из-за наличия в системе перемещений контролируемой поверхности. Это приводит к фильтрации восстанавливаемых пространственных частот.



*Рисунок 2.* Фильтрующая функция sinc(πv<sub>.</sub>T)

На рис. 2 представлена фильтрующая функция, зависящая от величины перемещения исследуемой поверхности.

Из рисунка видно, что чем меньше величина перемещения, тем больший диапазон пространственных частот можно восстановить. С другой стороны, при малых значениях перемещений шум, присутствующий при измерениях, будет оказывать заметное влияние на точность восстановления. Таким образом, метод имеет ограничения, связанные с выбором величины перемещения исследуемой поверхности, которые необходимо определить.

# АНАЛИЗ МЕТОДА АБСОЛЮТНОЙ КАЛИ-БРОВКИ ПО МЕТОДУ ДВУХ ПЛОСКОСТЕЙ ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ПОВЕРХНОСТ-НЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Для проверки метода двух плоскостей, был разработан алгоритм абсолютной калибровки в программной среде Matlab. В качестве теоретической модели поверхность была пред-

7	абли	ua	2.
_			

Преобразование пространственно-частотных диапазонов в диапазоны гармоник

Пространственно-частотный диапазон	Ι	II	III
Пространственный масштаб, мм	45033	332,5	2,50,12
Диапазон гармоник	113	13-180	13240

ставлена как совокупность синусоидальных функций или гармоник. Согласно требованиям, представленным в таблице 1, было проведено преобразование пространственных масштабов неоднородностей в диапазоны гармоник, для определения зависимости качества восстановления профиля поверхности от гармоники и величины перемещения (таблица 2).

Таким образом, исходная поверхность задавалась в виде набора синусоидальных функций и восстанавливалась при различных значениях перемещений (рис. 3).



Сравнение исходнои и восстановленно поверхностей в области низких пространственных частот

Как видно из рис. З профиль поверхности восстанавливается с ошибкой, связанной с выбором величины Т. Таким образом, для определения оптимального значения перемещения рассчитывалась линейная погрешность восстановления (2):

$$\Delta_{\rm лин} = \frac{\sigma_{\rm test0} - \sigma_{\rm test}}{\sigma_{\rm test0}} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где  $\sigma_{test0}$  – СКО профиля исходной поверхности,  $\sigma_{test}$  - СКО профиля восстановленной поверхности.

Зависимость ошибки восстановления поверхности, как функция от величины перемещения контролируемой плоскости и от гармоники, представлена на рис. 4. Светлая область на рисунке означает диапазон пространственных частот, который восстанавливается с минимальной линейной погрешностью.



ависимость ошибки восстановления поверхности от перемещения и гармоник

Исследование показало, что метод способен восстановить профиль в области низких пространственных частот () для перемещений до 36 мм с погрешностью менее 5% (таблица 3) [10].

Пространственно-частотный диапазон	I		п			III						
Пространственный масштаб, мм	45033			332,5			2,50,12					
Перемещение Т, мм	36-5,2			5,2-0,87			0,87					
Диапазон гармоник	113				13-180			13240				
Номера гармоник	1	5	9	13	20	32	60	180	25	50	200	240
Погрешность $\Delta_{\text{лин}}$ , %	2,2	2,34	2,9	3,93	5,9	8,7	14,4	52,2	6,1	12	59,4	69,2

Таблица 3.
Результаты математического моделирования

Для области высокочастотных поверхностных неоднородностей восстановление происходит с большой погрешностью даже при минимальных значениях перемещений от 0,87 до 5,2 мм. Таким образом, стоит задача разработки алгоритма калибровки для высокочастотных неоднородностей поверхности.

# АНАЛИЗ МЕТОДА АБСОЛЮТНОЙ КА-ЛИБРОВКИ ПО МЕТОДУ ДВУХ ПЛОСКО-СТЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПО-ВЕРХНОСТНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Поскольку технические требования к изготовляемой поверхности являются строгими и в отношении высокочастотных поверхностных неоднородностей, а ранее описанный метод не дает достаточной точности, то для оценки качества восстановления профиля поверхности в высокочастотной области был предложен расширенный метод двух плоскостей [9]. Измерение контролируемой поверхности происходило в восьми положениях (m<sub>1</sub>(x,y)...m<sub>8</sub>(x,y)), определяемых двумя горизонтальными T<sub>1</sub> и двумя вертикальными T<sub>2</sub> перемещениями (рис. 5).



Затем измерения усреднялись, и профиль исследуемой поверхности вычислялся путем вычитания этого усреднения из центрального измерения (3):

$$\begin{aligned} h_{\text{test}}(x,y) &= m_9(x,y) - \frac{\left(A_1(x,y) + A_2(x,y)\right)}{2}, \end{aligned} \tag{3} \\ \text{где} \quad A_1(x,y) &= \frac{m_1(x, y) + m_2(x,y) + m_3(x,y) + m_4(x,y)}{4} = \\ &= h_{\text{ref}} + \frac{1}{2} \iint \left(\cos(\pi v_x T_1) + \cos(\pi v_y T_1)\right) \cdot \mathcal{F}^{-1}\{\widetilde{h_{\text{test}}}(v_x,v_y)\} \, dv_x dv_y; \\ A_2(x,y) &= \frac{m_5(x,y) + m_6(x,y) + m_7(x,y) + m_8(x,y)}{4} = \\ &= h_{\text{ref}} + \frac{1}{2} \iint \left(\cos(\pi v_x T_2) + \cos(\pi v_y T_2)\right) \cdot \mathcal{F}^{-1}\{\widetilde{h_{\text{test}}}(v_x,v_y)\} \, dv_x dv_y. \end{aligned}$$

Также как и в алгоритме абсолютной калибровки для низкочастотных неоднородностей, восстановление поверхности происходит с некоторой погрешностью, связанной с наличием в системе перемещений контролируемой поверхности. Как видно из выражения (3), качество восстановления исходного профиля зависит от двух фильтрующих функций (4):

$$\begin{split} F_{1}(\nu_{x},\nu_{y}) &= \frac{1}{2} \iint \left( \cos(\pi\nu_{x}T_{1}) + \cos(\pi\nu_{y}T_{1}) \right), \\ F_{2}(\nu_{x},\nu_{y}) &= \frac{1}{2} \iint \left( \cos(\pi\nu_{x}T_{2}) + \cos(\pi\nu_{y}T_{2}) \right). \end{split}$$
(4)

Значения перемещений T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> должны выбираться таким образом, чтобы как можно больше ослабить влияние фильтрующих функций на восстановление поверхности.

В качестве примера, для восстановления профиля был выбран диапазон высокочастотных поверхностных неоднородностей от 10 до 33 мм, а также выбраны величины перемещений T<sub>1</sub>=50 мм и T<sub>2</sub>=80 мм.

На рис. 6 представлены фильтрующие функции F<sub>1</sub> (v<sub>x</sub>,v<sub>y</sub>) и F<sub>1</sub> (v<sub>x</sub>,v<sub>y</sub>) для измерений с перемещением T<sub>1</sub>=50 мм (рис. 6а) и T<sub>2</sub>=80 мм (рис. 6б), а также общая фильтрующая функция для восьми измерений (рис. 6в), рассчитываемая как (5):

$$F(v_{x}, v_{y}) = \left[1 - \frac{1}{4} \left(\cos(\pi v_{x} T_{1}) + \cos(\pi v_{y} T_{1}) + \cos(\pi v_{x} T_{2}) + \cos(\pi v_{y} T_{2})\right)\right]$$
(5)



Рисунок 6. Фильтрующие функции в области высоких пространственных частот

Заштрихованная область в форме кольца на рис. 6. определяет диапазон неоднородностей 10-33 мм.

Светлые участки на графиках обозначают области, в которых погрешность восстановления минимальна, а темные участки соответствуют областям с высокой погрешностью восстановления. Видно, что светлые и темные области чередуются. Это говорит о том, что не все пространственные частоты будут восстанавливаться.

В качестве проверки метода был разработан алгоритм абсолютной калибровки для высокочастотных пространственных неоднородностей, и на рис. 7 представлен графический результат его работы по восстановлению исходного профиля поверхности, заданного в виде гармоник.



Рисунок 7. Сравнение профилей исходной и восстановленной поверхностей в области высоких пространственных частот

Как видно из таблиц 3 и 4, определенные гармоники высокочастотного диапазона восстанавливаются с меньшей погрешностью. Таким образом, рассмотренный метод может быть использован в качестве абсолютной калибровки поверхности в высокочастотной области [11].

Пространственный масштаб, мм	10-33							
Перемещение Т <sub>1</sub> , мм	50							
Перемещение Т <sub>2</sub> , мм	80							
Диапазон гармоник	18-60							
Номера гармоник	20	32	60					
Погрешность $\Delta_{\text{лин}}$ , %	1,4	0,8	2,6					

Таблица 4.
Результаты математического моделирования

Дальнейшей задачей исследований стоит разработка оптимизационной функции для подбора значений T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub>, с целью уменьшения погрешности восстановления, а также расширения диапазона восстанавливаемых пространственных частот.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяют разработке высокотехнологичных оптикоэлектронных систем. Поскольку поверхности элементов, входящих в состав их оптических схем, отличаются высокой точностью, то разработка методов их контроля является актуальной задачей. В связи с тем, что качество исследуемой детали сопоставимо с качеством эталонной поверхности, то для получения объективных результатов используют методы абсолютной калибровки эталонной поверхности. В данной работе были рассмотрены существующие методы абсолютной калибровки, такие как: метод трех плоскостей, метод, основанный на разложении профиля на полиномы Цернике и метод двух плоскостей.

Были реализованы алгоритмы абсолютной калибровки по методу двух плоскостей в программе Matlab для низкочастотного и высокочастотного пространственного диапазонов неоднородностей, и проведен анализ их погрешностей. Исследование показало, что метод двух плоскостей способен восстановить профиль в области низких пространственных частот для перемещений до 36 мм с погрешностью 4,96 %, и при выбранных значениях  $T_1$ =50 мм и  $T_2$ =80 мм, с погрешностью 5,8 % в высокочастотной области.

Дальнейшие исследования будут направлены на нахождение оптимальных значений перемещений, для расширения границ применимости метода двух плоскостей, а также на применение разработанных алгоритмов для анализа реальных экспериментальных данных, как в низкочастотном, так и в высокочастотном пространственном диапазоне.

#### Список литературы:

1. Giant Magellan Telescope [Электронный реcypc]. URL: http://www.gmto.org/ (дата обращения: 16.04.2018).

2. *Carruthers T. F., Reitze D.H.* (2015). LIGO: Finally Poised to Catch Elusive Gravitational Waves? Optics and Photonics News, Vol.26, №3, 44-51.

3. *Campbell J. H.* NIF optical materials and fabrication technologies: An overview // Proceedings of SPIE. – 2004. – Vol. 5341.

4. *Малакара Д*. (ред.). Оптический производственный контроль. Пер. с англ. Е. В. Мазуровой и др. М.: Машиностроение, 1985. — 400 с.: ил.

5. *G. Schulz and J. Schwider*. "Precise measurement of planeness," Appl. Opt. 6, 1077–1084 (1967).

6. *C.Ai and J. C. Wyant.* "Absolute testing of flats by using even and odd functions," Appl. Opt. 32, 4698–4705 (1993).

7. *Chiayu Ai and James C*. Wyant Absolute testing of flats decomposed to even and odd functions. 5PIE Vol. 1776 Interferometry: Surface Characterization and Testing (1992).

8. *Dongqi Su, Erlong Miao, Yongxin Sui, and Huaijiang Yang.* Absolute Measurement of Flats with the Method of Shift-Rotation. OPTICAL REVIEW Vol. 20, No. 5 (2013) 374–377

9. *F. Morin and S. Bouillet*, "Absolute interferometric measurement of flatness: application of different methods to test a 600 mm diameter reference flat," Proc. SPIE, No. 6616, 66164G (2007).

10. Мартынова Д.К., Гладышева Я.В., Барышников Н.В. «Анализ погрешностей метода абсолютной калибровки для высокочастотных неоднородностей на оптической поверхности». Всероссийская студенческая конференция «Студенческая научная весна», посвященная 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Москва, 2018 (в печати)

11. Мартынова Д.К., Гладышева Я.В., Барышников Н.В. «Анализ погрешностей метода абсолютной калибровки крупногабаритных оптических деталей». XXIX международная конференция "Лазеры в науке, технике, медицине", Москва, 2018, т.29 (в печати).