



Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»
Издается с 2002 г.

СОДЕРЖАНИЕ**НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ**

Белозеров А.Ф., Лукин А.В., Штырков Е.И.
Казанская школа голографии 3

**Полесский А.В., Соломонова Н.А., Семенченко Н.А.,
Храбров П.В.**
Оценка погрешности измерения спектральной характери-
стики чувствительности фотоприемников на основе InGaAs 20

Козлов К.В., Хамидуллин К.А.
Моделирование влияния фотоэлектрической связи на даль-
ность работы оптико-электронных систем 28

**РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Малькин А.А., Фуфурин Л.В., Шмидт А.И.
Разработка объективов для телевизионных камер и прибо-
ров ночного видения с применением ограниченной номен-
клатуры марок стёкол 35

Кузнецов С.А., Немтинов В.Б., Сериков В.Ю.
Структура и качество процесса преобразования сигналов в
оптико- и лазерно-электронной системе 39

**Шапиро Б.Л., Сухачев А.Б., Перчаткин Н.А.,
Державин Д.С., Никитин Н. Ю.**
Формирование структуры протокола информационного взаи-
модействия между оптико-электронной и бортовой система-
ми с использованием определений общей теории систем 55

**Карпов В.В., Козырев М.Е., Кузнецов Н.С.,
Марущенко А.В.**
Охлаждаемые фотоприемные устройства для дистанцион-
ного зондирования земли 62

Карев П.В.
Миниатюрные пьезоэлектрические механизмы для электро-
оптических и космических применений 67

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

Калинин Ю.А., Крехова Е.Ю., Поздняков А.Е.
Организация производственного контроля лучевой проч-
ности оптических материалов и покрытий на лазер-
ной установке с наносекундной длительностью излуче-
ния..... 73

Понин О.В., Селиверстова Ю.О., Шаров А.А.
Особенности юстировки внеосевого телескопа типа Мер-
сенна 82

Горелик Б.Д., Рычков А.С.
Вопросы теории получения сверхгладких поверхностей
оптических деталей 86



СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

Митрофанова Ю.С., Санникова И.М., Сеник Б.Н.

Технологические особенности изготовления сегментированных внеосевых оптических элементов 97

Тимофеев О.В., Леонов Е.С.

Формообразование плоских и сферических поверхностей в процессе механической обработки оптических элементов на основе поликристаллического CVD ZnSe с последующим нанесением покрытий 101

Новиков В.П., Гаврищук Е.М., Мазавин С.М., Тимофеев О.В.

Крупногабаритный мультиспектральный материал селенида цинка, полученным методом CVD для диапазона 0,5 – 14 микрон 109

ИНФОРМАЦИЯ

Выдающийся деятель оптической промышленности 114

К юбилею Пелиха С.А. 116

Пелих С.А.

Основы монетарной политики Республики Беларусь в современных условиях 117

Майков Б.П.

Памяти Генерального конструктора оптических систем Виктора Васильевича Некрасова 120

КАЗАНСКАЯ ШКОЛА ГОЛОГРАФИИ

БЕЛОЗЕРОВ А.Ф.*, ЛУКИН А.В.*, ШТЫРКОВ Е.И.**

*АО «Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики»

**Казанский физико-технический институт Казанского научного центра Российской академии наук

E-mail: gipo@telebit.ru, npogipo@tnpko.ru

Кратко рассмотрена история развития работ по голографии в стране. В 1960 годах они были успешно начаты на базе двух оптических лабораторий Государственного института прикладной оптики (ГИПО). К середине 1970 годов направление оптической голографии стало одним из важнейших технических направлений института. Позднее работы по голографии, кроме ГИПО, стали вести около десятка организаций Казани (включая ВУЗы, академические институты, конструкторские и проектные бюро, крупные заводы, мелкие фирмы), создав оригинальную Казанскую голографическую школу. Эта школа развивалась при научном руководстве академика Ю.Н. Денисюка. Она воспитала более 50 сотрудников с ученой степенью.

Ключевые слова: голограмма, запись волнового фронта, восстановление волнового фронта, фоточувствительная регистрирующая среда, голографическая интерферометрия.

ГОЛОГРАФИЯ И ЕЁ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ НОВОГО ОБЛИКА ОПТИКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

XVII век стал веком великих открытий в оптике: голландский учёный **Виллеброрд Снеллиус** открыл законы преломления света (1621 г.), француз **Рене Декарт** вывел формулу линзы, обеспечивающей коррекцию сферических aberrаций (1637 г.), итальянец **Кавальери** объединил величины фокусного расстояния линзы, кривизны её поверхности и показателя преломления в соотношение, называемое формулой линзы (1647 г.), **Пьер Ферма** сформулировал принцип наименьшей оптической длины пути светового луча (1660 г.), голландец **Христиан Гюйгенс** нашёл форму преломляющих поверхностей линз, не дающих сферической aberrации для некоторых частных случаев (1652 г.). Гюйгенс предположил (1678 г.), что свет распространяется подобно волне (волновая теория света), однако в 1704 году англичанин **Исаак Ньютон** изложил другую точку зрения: свет, состоящий из лучей, обладающих различной способностью преломляться, и распространяется в виде лучей (корпускулярная теория света). Тем не менее, на границе веков, два

великих физика Гюйгенс и Ньютон сформулировали основные принципы дифракции и интерференции света.

Таким образом, к началу XVIII века были определены основные законы и формулы геометрической оптики для получения оптического изображения предметов, а также волновой природы явлений интерференции и дифракции света [1].

Человека во все времена характеризовало желание видеть, знать и понимать изображения окружающей среды, предметов, животных, наконец, самого себя и себе подобных. Вместо примитивных по форме рисунков на скалах, символических фигур идолов, воинов, женщин, постепенно возникали и повышались требования к качеству изображения: оно становилось объёмным (трёхмерным), полноцветным (псевдоцветным, квазицветным), динамическим – полным аналогом натуры.

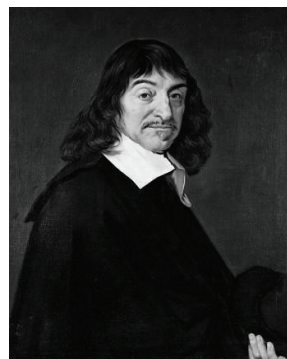
Фотография (вначале это была дагерротипия – по имени изобретателя – француза **Луи Дагерра** – 1837 год), интегральная фотография француза **Габриэля Липпмана** (1852 год), стереоскопия – разделы оптической науки, в рамках которых проводились исследо-



Снеллиус Виллеборд



Кавальери



Декарт Рене



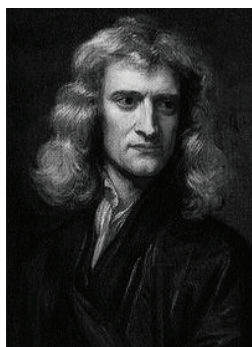
Гримальди Франческо



Ферма Пьер



Гюйгенс Христиан



Ньютон Исаак



Дажерр Луи



Юнг Томас

вания по повышению качества оптического изображения.

В своих последних книгах и статьях, в которых рассмотрены основные достижения и предложения по развитию оптики в современной России, Почётный директор Государственного оптического института (ГОИ) им. С.И. Вавилова член – корреспондент Российской академии наук (РАН) **М.М. Мирошников** предложил и сформулировал пять крупных взаимосвязанных основ – разделов современной оптики, определяющих её содержание, а также место, которое должны занимать исследования в области получения и обработки оптических изображений, имея ввиду, в том числе и многовековые дискус-

сии учёных-оптиков о природе света и его дуализме, основанном на реальном восприятии волновой (электромагнитной) и корпускулярной теорий света. Формулировки М.М. Мирошникова, раскрывающие содержание современной оптики [2,3]:

- волновая оптика – наука, изучающая совокупность явлений, в которых проявляется волновая (электромагнитная) природа света;
- физика фотонов – наука о корпускулярных (квантовых) свойствах света, его микроструктуре; её практическое применение – фотоника;
- иконика – наука об изображении, его качестве и распознавании с учётом законов зрительного восприятия;

- оплотехника – наука о приборах, основанных на оптике (оптическое приборостроение);
- оптическое материаловедение – наука о свойствах и технологии создания оптических сред с заранее заданными свойствами (стекло, кристаллы, керамика и т.д.).

Фундаментальной основой оплотехники являются: положения волновой оптики (интерференция, дифракция, распространение, отражение и преломление света, его поляризация), явления, связанные с физикой фотонов (фотофизические и фотохимические превращения, в том числе фотоэффект, фотохимия), иконика, теория выделения оптического сигнала на фоне помех. Таким образом, вычислительная оптика, оптические технологии, оптико-электронное приборостроение, лазерная техника и фотоника* – это составляющие части оплотехники.

Сравнительно новым направлением работ в области оптического изображения является использование дополнительных каналов в аппаратуре, применяемой для получения изображения: рентгеновских, ультрафиолетовых, телевизионных, тепловизионных, электронно-оптических, фотоэлектрических, терагерцевых, миллиметровых, а также автоматизированной обработки (расшифровки) картин, полученных в различных каналах.

В 1970-1990 годах интенсивно развиваются иконика и информатика. Теория информации, возникшая в конце 1940-х годов, оказала сильное влияние на понимание теории изображений, процесса преобразования изображений и теории оптических систем в целом. Оптика предложила значительное увеличе-

ние скорости преобразований сигналов, связанное с возможностью параллельной обработки (ранее электронные методы обработки сигналов были аналоговые и одномерные и опирались на использование большого числа дискретных устройств).

Изобретение приборов с зарядовой связью в 1969 году привело к некоторому отстранению оптики от обработки сигналов. Электрическое детектирование позволило преобразовывать оптические явления в электронный формат и далее применять хорошо развитые электронные методы цифровой обработки.

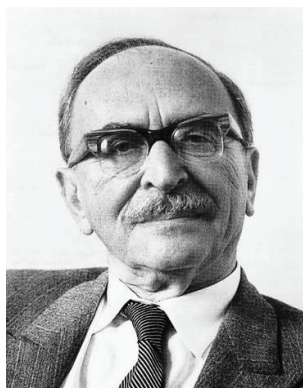
Интересные результаты последних лет в технике обработки изображений опираются не на оптические устройства или физику света, а на эффективное применение технологии обработки сигналов.

В начале второй половины XX столетия в области световых технологий были сделаны три выдающихся открытия, которые внесли революционные изменения в устоявшуюся к тому времени науку «оптика» – это создание лазеров – источников высококогерентного и одновременно мощного излучения оптического диапазона, нелинейной оптики, как результата действия такого излучения на вещество и оптической голографии, как наиболее полного способа регистрации пространственно-временных характеристик волновых полей различной природы [4] и, на этой основе, создание важнейшего способа повышения качества оптического изображения.

Истории возникновения и развития голографии к настоящему времени посвящено огромное количество работ и исследований.

*В последние годы отдельные правительственные и технические структуры, ассоциации, средства массовой информации (СМИ) Российской Федерации используют слово-понятие «фотоника» вместо понятия «оптика», имеющего более широкое содержание и физическую основу. Для этого, по аналогии с фирмами и СМИ западных стран, необоснованно расширяют функции науки «фотоника», вводя в неё, кроме исследований и разработок в области физики фотонов и лазерной техники, содержание значительной части науки «оптика» в целом, прежде всего, наиболее «продвинутых» в коммерческом плане разделов оплотехники, а также новых технических направлений, таких как полупроводниковая светодиодная светотехника, фотоэнергетика.

На уровне Правительства Российской Федерации в 2014 году рассматривалась «Дорожная карта» развития фотоники. Такая подмена понятий, противоречащая здравому, обоснованному физически, смыслу, проводится, якобы, для ускорения решения финансовых проблем оптики в целом. Авторы данной статьи, во избежание в будущем конфликтных ситуаций, настойчиво предлагают специалистам всех уровней придерживаться терминологии, предложенной крупнейшим учёным-оптиком страны М.М. Мирошниковым.



Габор Деннис

Основополагающий вклад в голографию был сделан в пионерских работах **Денниса Габора**, стремившегося улучшить качество изображений, создаваемых электронным микроскопом, путём перевода поля электронной волны в оптический диапазон, поскольку здесь опыт и методы борьбы с волновыми aberrациями пучков были гораздо более успешными.

Таким образом, Д. Габор впервые практически использовал фундаментальную теорию единства волновых полей различной природы. Он показал возможность одновременной регистрации на плоскости амплитуды и фазы волнового поля излучения, которое проходит сквозь объект, содержащий в себе оптическую информацию, с последующим восстановлением этого поля и информации об объекте путём освещения полученной интерференционной картины в полосах бесконечной ширины.

Этот метод, названный Габором голографией, или полной записью волнового поля, был обоснован им теоретически и экспериментально (в видимой области спектра, с помощью фотографических материалов) [5].

Принципиально важным фактором последующего развития голографии явилось изобретение лазеров и получение американскими учёными (Массачусетский технологический университет) **Эмметом Лейтом и Юрисом Упатниексом** внеосевых пропускающих голограмм. Они впервые использовали в своих экспериментах при записи голограмм только что появившийся гелий-неоновый (He-Ne) лазер – идеальный источник света для данной цели, сочетающий



Денисюк Юрий Николаевич

достаточно высокую мощность излучения с предельно высокой степенью пространственно-временной когерентности, необходимой для качественной записи интерференционных картин рассеивающих и протяжённых по глубине объектов. В отличие от Габора, они ввели в схему записи наклонный опорный пучок – приём, широко используемый в классической интерферометрии для получения интерферограмм в полосах конечной ширины. В результате им удалось привлечь всеобщее внимание исследователей к достижениям голографии.

Э. Лейт и Ю. Упатниекс в 1961-1962 годах опубликовали идею и теорию голограмм с боковым опорным пучком, которые они, как и Д. Габор, перенесли в оптический диапазон частот из иного, на сей раз длинноволнового СВЧ-диапазона [6].

Огромен и значителен вклад в развитие голографии нашего соотечественника академика **Юрия Николаевича Денисюка**, сотрудника ГОИ им. С.И. Вавилова. Иногда результаты его работ рассматриваются как некоторое усовершенствование первоначальной простейшей однолучевой схемы записи Габора путём замены попутного опорного пучка на встречный. Это позволило получить высококачественные изображения предметов, в том числе и цветные, при освещении голограмм некогерентным белым светом, что значительно расширило область применения таких голограмм. Однако сам Юрий Николаевич неоднократно говорил, что задачей и главным результатом его усилий было открытие общего физического явления отображения оптических свойств объекта в волно-

вом поле рассеянного им излучения, а разработка метода получения трёхмерных цветных изображений, создающих полную иллюзию присутствия регистрируемого объекта, была лишь первым этапом на этом пути [7-9].

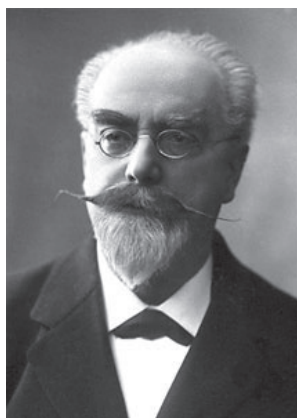
Формула открытия Ю.Н. Денисюка № 88 с приоритетом от 1 февраля 1962 года:

«Установлено ранее неизвестное явление возникновения пространственного неискажённого цветного изображения объекта при отражении излучения от трёхмерного элемента прозрачной материальной среды, в которой распределение плотности вещества соответствует распределению интенсивности поля стоячих волн, образующихся вокруг объекта при рассеянии на нём излучения».

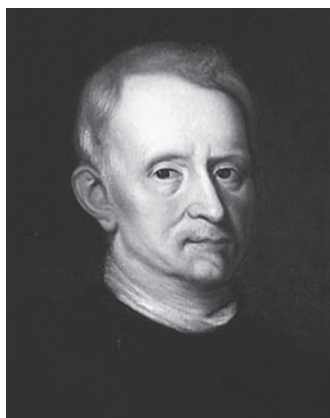
Ученик Юрия Николаевича профессор **Д.И. Стаселько** считает [10]: «Тридцатидвухлетний аспирант Ю.Н. Денисюк сделал своё открытие в декабре 1959 года, т.е. ранее появления первых лазеров и работ Лейта и Упатниекса в области оптической голографии. При этом он опирался исключительно

на собственные силы и располагал предельно ограниченным набором средств и ресурсов для достижения поставленных им целей. Он установил фундаментальное свойство трёхмерной голограммы – способность к записи и восстановлению четырёхмерных пространственно-временных характеристик волновых полей, придав, тем самым, голографии завершённую форму. Новое для голографии измерение было использовано для воспроизведения цвета источника излучения, записывающего голограмму.

Он придал понятию «голография» смысл полной записи информации о волновом поле излучения, рассеянного любым физическим объектом. Он стал создателем научных основ оптической голографии как самостоятельного научного направления в оптике. Идеи трёхмерной голографии оказали существенное влияние на развитие ряда важных направлений современной волновой физической оптики, как, например, фотонные кристаллы и обращение волновых полей, и «поставили



Липпман Габриэль



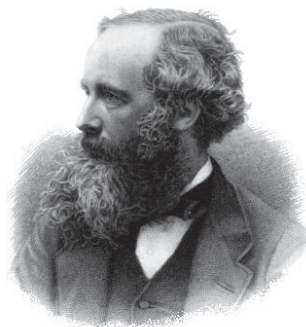
Гук Роберт



Этьен Луи Малюс



Френель Огюстен Жан



Максвелл Джеймс Клерк



Зоммерфельд

Ю.Н. Денисюка в один ряд с её творцами, начиная от **Роберта Гука, Франческо Гримальди, Христиана Гюйгенса, Исаака Ньютона, Томаса Юнга, Малюса, Огюстена Жана Френеля, Максвелла**, и кончая Липпманом, **Зоммерфельдом** и **Габором**» [10].

Таким образом, голография появилась (была изобретена) не «вдруг», не «случайно», а как результат исследований великих ученых-оптиков мира в течение нескольких веков и занимает вполне конкретное место в огромной системе мировых ценностей и научных знаний в области получения и обработки оптического изображения, качества изображения.

КАЗАНСКАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Специалисты Государственного института прикладной оптики (ГИПО) тоже оказались в нужное время в нужном месте в годы «обвального» развития работ по голографии (1960 – 1990 гг.), чтобы создать Казанский «куст голографистов» страны, имеющий свои теоретические основы, свою элементную базу и, наконец, признанные в мире результаты исследований.

ГИПО был основан в 1957 году как филиал ГОИ им. С.И. Вавилова. ГИПО получил самостоятельность в 1966 году. В первые годы деятельности филиала его научную тематику определяли, в основном, ученые ГОИ, поручая молодому, энергичному коллективу не только практическую реализацию своих научных идей, но и проведение исследований по новым научным направлениям. В «лазерный» период к ним можно было отнести разработку и исследование высокоинтенсивных импульсных источников света, а также средств оптической локализации и связи, построенных на их основе. Для этих целей была создана оптическая лаборатория, сотрудники которой прошли многомесячную стажировку в ГОИ. В 1961-1962 годах лаборатория пополнилась способными молодыми физиками из ВУЗов Казани, Ленинграда и других городов страны [1]. Узнав о созданном в США в 1960 году лазере на рубине, специалисты лаборатории уже в начале 1963 года получи-

ли генерацию на «рубиновой» длине волны ($\lambda=0,69$ мкм).

В августе 1963 года лабораторию возглавил **Камиль Сабирович Мустафин** – высококлассный специалист в области физики плазмы и спектроскопии, незадолго до этого защитивший кандидатскую диссертацию в Ленинградском университете под руководством члена-корреспондента Академии наук (АН) СССР **С.Э. Фриша**. По инициативе К.С. Мустафина и под его руководством был поставлен ряд научно-исследовательских работ (НИР) по изучению газовых разрядов различных типов (положительный столб, полярный катод, отрицательное свечение, дуговой разряд, импульсные режимы) с целью получения оптимальных условий генерации газоразрядных лазеров. В 1964 году была получена генерация в разряде He-Ne на длинах волн $\lambda=1,15$ мкм и $\lambda=0,63$ мкм. В 1966 году был разработан He-Ne лазер с рекордной для того времени мощностью (**Г.Н. Буйнов**, $\lambda=0,63$ мкм, 60 мВт).

Однако ГОИ полностью «забрал под себя» лазерную тематику, оставив 20 молодых людей без уже считавшегося «нашим» дела. Поиск новой тематики привёл их к голографии. В лаборатории были начаты исследования сенситометрических свойств высокоразрешающих галоидо-серебряных фоторегистрирующих материалов (**Н.П. Ларионов, А.В. Лукин, А.И. Садыкова**). Совместно с создаваемой в ГОИ лабораторией голографии под руководством Ю.Н. Денисюка в лаборатории ГИПО стали выполняться фундаментальные исследования по изучению отображающих свойств голограмм и поиску путей их эффективного использования в качестве оптических элементов, изучению аберраций голограммных оптических элементов, в том числе, компьютерных – синтезированных.

Интерес к голографии естественным образом возник у специалистов лаборатории филиала ГОИ, которая с 1958 года выполняла разработки интерференционных и теневых приборов для оснащения ими аэродинамических установок. Лабораторию воз-



*Мирумянц
Сурен Осипович*



*Барашев
Владимир Владимирович*



*Стрежнев
Степан Александрович*

главлял бывший ленинградец (сотрудник Государственного оптико-механического завода (ГОМЗ), эвакуированного в Казань) **В.В. Барашев**. Вскоре это научное направление (оно было передано из ГОИ в ГИПО) возглавил **А.Ф. Белозеров**, принятый на работу в ГИПО в 1960 году, и прошедший стажировку в ГОИ под руководством выдающегося специалиста по интерферометрии **А.А. Забелина**. При поступлении А.Ф. Белозерова в аспирантуру ГОИ тема его будущей диссертации касалась изучения пространственных газовых потоков. Базой для экспериментальной работы стала Военно-воздушная инженерная академия (ВВИА) имени Н.Е. Жуковского, а первым научным руководителем был начальник академии генерал-полковник, профессор **С.М. Белоцерковский***.

Перспективность применения голографии в интересах газодинамики была быстро оценена. В 1980-х годах в лаборатории интерференционно-теневых приборов работали уже около 20 высококвалифицированных специалистов, в том числе 8-10 человек с учёной степенью, для них «задач не по плечу» не было. Практически каждый из 20 человек был яркой личностью, имел свою точку зре-

ния. Объединение их сил и знаний на главном направлении исследований (а таковым и была голографическая интерферометрия) позволило лаборатории (см. рис. 2) стать широко известной в стране.

Таким образом, молодой коллектив специалистов ГИПО оказался превосходно подготовленным к выполнению НИОКР по голографии [1,11]. Не случайно именно в ГИПО вскоре были решены крупные прикладные голографические задачи: голографическая интерферометрия неоднородностей в прозрачных средах [12], интерферометрический контроль всех видов асферической оптики [13]. Важно, что это новое направление исследований активно поддерживал директор института **С.О. Мирумянц**.

Первые успехи пришли быстро. В 1966 году на голографической конференции в Ереване специалисты лаборатории интерференционных приборов уже демонстрировали интерферограммы обтекания модели самолета потоком воздуха в аэродинамической сверхзвуковой трубе ВВИА. При посещении ГИПО в это же время Министр оборонной промышленности СССР **С.А. Зверев** был доволен: «Это вам не «пятаки» показывать»**.

*Спустя год научным руководителем диссертации стал военный ученый, полковник В.С. Сухоруких, полюбивший новое направление физической оптики – голографию.

**Эта фраза министра говорит о жестком непринятии им, видимо, часто демонстрируемых ему простейших результатов воздействия лазерного излучения на «пятаки» - монеты, а ГИПО апостериорно показал в г. Казани интерференционную картину обтекания модели реального самолета в реальной аэродинамической трубе, полученную в Москве.

Сотрудниками лаборатории разработаны теоретические основы, принципы построения и оптимизации характеристик голографических интерферометров и теневых приборов; с использованием голографических технологий совместно с Центральным конструкторским бюро (ЦКБ) «Фотон» и Казанским оптико-механическим заводом (КОМЗ) разработаны и изготовлены десятки новых приборов с размерами наблюдаемого поля от 230 мм до 800 мм, на уровне проработок – до 1500 мм, для оснащения ими аэродинамических труб, баллистических трасс, энергоустановок, плазмотронов ведущих аэрокосмических, теплоэнергетических лабораторий и НИИ. Созданы принципиально новые экономически приемлемые оптические системы голографических интерферометров, в которых в качестве высокоточных объективов коллиматоров использованы синтезированные голограммные оптические элементы (СГОЭ).

По своему техническому уровню разработки тех лет по схемотехнике и оптимизации характеристик оптических систем часто опережали аналогичные работы известных западных лабораторий и фирм. Они и сегодня могут быть использованы при постройке и оснащении необходимых для обеспечения военно-экономической безопасности страны новых газодинамических лабораторий и модернизации существующих. Однако пока они остаются не востребованы, складывающаяся по направлению ситуация приближает нас к «точке невозврата». Остаётся надежда, что научные отчёты с отработанными техническими предложениями, как и рукописи, «не горят» (как показывают события в книгохранилищах Академии наук в 2015 году, и это не всегда возможно).

На основе использования СГОЭ была решена кардинальная для отрасли технологическая проблема контроля с интерферометрической точностью всех видов асферических оптических поверхностей, результаты разработок внедрены на 5-6 оптических заводах.

Важным направлением работ ГИПО стали разработки и серийный выпуск голограмм-

ных оптических элементов (ГОЭ) – физических и синтезированных голограмм, выполняющих преобразования световых полей как аналогичные преобразования, осуществляемым классическими оптическими элементами, так и специфические, определяемые возможностями голографии. ГОЭ сегодня составляют значительную и быстро растущую часть элементной базы оптико-электронного приборостроения [13]. Физические ГОЭ получают путём регистрации интерференционной картины при наложении двух когерентных световых волн – отражательные и пропускающие дифракционные решётки, внеосевые и осевые голограммные линзы, селективные зеркала, узкополосные фильтры (Notch-filters), светоделители и мультипликаторы лазерных пучков, элементы микроволновой оптики и оптики волоконно-оптических линий связи.

Голограммные дифракционные решётки (ГДР) отличаются от нарезных, получаемых на уникальных делительных машинах, тем, что полностью свободны от «духов», обусловленных погрешностями деления, и имеют значительно меньший уровень рассеянного света. В качестве светочувствительных материалов для ГДР часто используют халькогенидные стеклообразные полупроводники, которые наносятся на плоские и вогнутые (в том числе асферические) рабочие поверхности подложек путём вакуумного напыления. При их записи удаётся эффективно корректировать различные типы aberrаций. Следует отметить, что на возможность получения дифракционных решеток методами голографии впервые указал Ю.Н. Денисюк. Голограммные решётки могут быть изготовлены со значительно большими значениями размеров и пространственных частот, чем у классических нарезных решёток, у которых предельные значения этих параметров ограничены фактором износа алмазного резца. Полученные копии рельефно-фазовых ГДР имеют квазисинусоидальный профиль штрихов. Для получения ГДР с «пилообразным» профилем штрихов используют схемы записи во встречных пучках или специальные ме-



*Мирошников
Михаил Михайлович*



*Слюсарев
Георгий Георгиевич*



*Фриш
Сергей Эдуардович*



*Забелин
Анатолий Алексеевич*



Белоцерковский С.М.



*Стаселько
Дмитрий Иванович*

тоды обработки их рельефно-фазовых структур после проявления. Часто применяются методы ионного травления.

Особое место среди ГДР занимают пропускающие объёмно-фазовые решётки, изготавливаемые на слоях бихромированной желатины (БХЖ). У этих решёток поляризационные эффекты сведены к минимуму. Их наибольший световой диаметр порядка 100 мм.

Селективные голограммные зеркала и узкополосные фильтры изготавливаются на «толстых» слоях БХЖ с экспонированием по схеме Ю.Н. Денисюка. Селективные зеркала находят применение в качестве дихроичных светоделителей, в частности, в системах отображения визуальной информации в видимой области спектра, в лазерной (рамановской) спектроскопии, а также для защиты фотоприёмных устройств оптико-электронной аппаратуры различного назначения и органов зрения операторов от воздействия мощных лазерных пучков в ультрафиолето-

вой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Спектральная кривая пропускания типичного Super Notch-Plus-фильтра, в отличие от классического многослойного фильтра, практически свободна от паразитных осцилляций и имеет высокую крутизну «крыльев». Оптическая плотность фильтра на выбранной длине волны превышает значение 6.

СГОЭ получают путём регистрации на подложках высокого оптического качества расчётной структуры голограммы. При расчете осевых СГОЭ определяют координаты колец или полос интерференционной картины, которая образовалась бы в плоскости голограммы в результате суперпозиции заданных аналитически опорного и объектного геометрических волновых фронтов. Осевые синтезированные голограммы выполняют функции образцовых, силовых и корректирующих оптических элементов [13].

Большой практический интерес представ-

ляет техническое решение контроля выпуклых крупногабаритных асферических поверхностей на основе использования принципа обращения волнового фронта. Здесь используются одновременно два ГОЭ: осевая синтезированная голограмма в качестве образцового оптического элемента, формирующего конгруэнцию лучей-нормалей к заданной оптической асферической поверхности, и физическая внеосевая голограмма, обеспечивающая, практически, полную коррекцию дефектов формирующей оптики интерферометра. Как правило, в качестве образцовых используют бинарные (двухуровневые) СГОЭ, дифракционная эффективность которых составляет 35-40 %.

Для применения осевых СГОЭ в качестве силовых и корректирующих элементов, их дифракционная эффективность должна быть существенно выше. Её увеличение (теоретически 100 %) достигается путём перехода от бинарной формы штрихов к многоуровневой, а в пределе – к пилообразной. Такие СГОЭ часто называют киноформами. Основные характеристики осевых СГОЭ, которые могут быть изготовлены на созданных в ГИПО трёх круговых делительных машинах МДА-9, МДА-10, МДГ: наибольший световой диаметр – 500 мм, пространственная частота 1500 мм^{-1} , дифракционная эффективность – более 95 %, погрешность формирования волновой поверхности – $0,05 \lambda$.

Киноформы являются уникальным средством коррекции хроматических аберраций линзовых центрированных систем (объективов), что особенно ценно для использования в ультрафиолетовой (УФ) и инфракрасной (ИК) областях спектра, здесь реализуются два известных свойства дифракционных структур: во-первых, их дисперсия обратна дисперсии традиционных оптических материалов, и, во-вторых, она может варьироваться в широких пределах, недостижимых для применяемых оптических стёкол и кристаллов. Следует отметить, что впервые (1957 г.) эту уникальную возможность использования дифракционных структур обосновал **Г.Г. Слюсарев** [14]. Подбором пар

оптических материалов путем соединения двух рельефно-фазовых голограмм можно существенно расширить рабочую спектральную область СГОЭ. В свою очередь, путем увеличения глубины рельефа СГОЭ можно реализовать «сжатие» рабочей спектральной области [13].

Высокая спектральная селективность СГОЭ может быть использована в фокусирующих системах, работающих в ограниченном спектральном диапазоне в условиях высокого уровня фоновых засветок, например, в солнечно-«слепых» оптических системах в области длин волн 220-290 нм (это свойство голограмм позволяет существенно увеличить отношение сигнал/фон на входе фотоприёмного устройства), а также при создании пропускающих СГОЭ, выполняющих функции полосового фильтра с полупрозрачностью около 20 нм.

Научный совет АН СССР по проблеме «Голография» рекомендовал включить работу ГИПО «Разработка технологии изготовления голограммных дифракционных решеток» в перечень «Важнейшие достижения АН СССР в области естественных и общественных наук за 1988 год».

Принципиальной физической основой применения голограмм в качестве оптических элементов и реализации других полезных свойств дифракционной оптики является теорема **Малюса-Дюпина** («Нормальная прямолинейная конгруэнция световых лучей остаётся нормальной после любого числа преломлений и отражений») и обратная теорема **Туллио Леви-Чивита** («Две любые нормальные прямолинейные конгруэнции световых лучей можно перевести друг в друга с помощью одного преломления или отражения») [15].

Мы исходим из того, что обе теоремы справедливы (с некоторыми уточнениями) и для случая дифракционных лучей. Тогда концовки этих теорем должны звучать так:

- у теоремы Малюса-Дюпина – «преломлений, отражений и дифрагирования»;
- у теоремы Леви-Чивита – «преломления, отражения и дифрагирования».

Поскольку теоретическая проработка и решение проблемы преобразования световых пучков с помощью современных дифракционных структур выполнены в последние 40 лет профессором ГИПО **А.В. Лукиным**, авторство этих двух теорем было бы целесообразно дополнить фамилией «**Лукин**»*.

Вызывают большой интерес новые технические направления практического использования СГОЭ, предложенные А.В. Лукиным:

- контроль центрировки линз,
- контроль процессов сборки и юстировки объективов (сюда можно отнести наборы фотообъективов и крупнейшие, уникальные асферические зеркала внеземных телескопов).

Имеющиеся в настоящее время голографические приёмники обладают большой инерционностью вследствие значительного временного интервала между ступенями голографического процесса. Поэтому большой интерес представляет динамическая голография с использованием малоинерционных процессов записи и восстановления волновых полей, реализующая возможность сокращения этого интервала. Она возникла в начале 1970-х годов. Первопроходцами здесь были белорусские физики **Е.В. Ивакин**, **А.С. Рубанов**, **Б.И. Степанов**, открывшие явление четырёхволнового динамического обращения волновых полей. Динамическая «эпидемия» неизбежно захватила украинских учёных. Её активно поддерживал Ю.Н. Денисюк.

Другой способ основан на использовании резонансного поглощения в веществах с малым временем релаксации. Переводя атомы из нижнего состояния резонансного перехода в верхнее, можно создать пространственное распределение коэффициента поглощения.

Профессор **Е.И. Штырков**, начавший работать по голографии в ГИПО в начале 1960-х годов, десять лет спустя, уже работая в Казанском академическом физтехе, теоретически обосновал и экспериментально осуществил эту идею, помещая, в частном слу-

чае, резонансную среду в место пересечения двух пучков когерентного света с плоскими волновыми фронтами. Он стал основоположником резонансной и эхо-голографии [16], которые нашли широкое применение в научных исследованиях. За эти работы вместе с учёными из других научных центров страны, в т.ч. с академиком Ю.Н. Денисюком, профессор **Е.И. Штырков** стал лауреатом Государственной премии СССР.

Оптическая эхо-голография – запись и восстановление волновых фронтов света, когда опорные, объектные и восстановленные волны не совпадают во времени. Эта ситуация принципиально отличается от обычной голографии, включая и динамическую голографию в резонансных средах, тем, что опорный и объектный пучки разнесены во времени настолько, что они не могут непосредственно интерферировать друг с другом. Однако информация о волновом фронте объектного поля может быть восстановлена спустя некоторое определённое время после воздействия на резонансную атомную регистрирующую среду. При определённых условиях возбуждения атомной системы она способна излучать задержанный во времени когерентный отклик в виде фотонного эха, волновой фронт которого зависит не только от формы волновых фронтов объектного и опорного полей, но и от порядка подачи этих полей на регистрирующую среду.

Необходимой физической основой такого вида голографии является наличие фазовой памяти у регистрирующей среды. При облучении вещества короткими, разнесёнными во времени импульсами когерентного света, взаимодействие этих волн друг с другом становится возможным лишь через среду и только в том случае, когда вещество среды обладает достаточно длинной фазовой памятью. Каждый импульс поля накачки передаёт информацию о своих волновых характеристиках в среду, и эта информация сохраняется до прихода следующих импульсов накач-

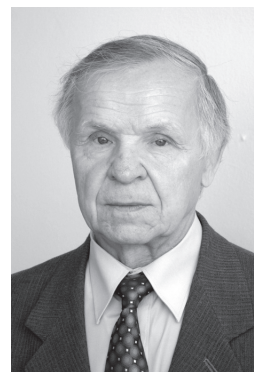
*Предложение Белозерова А.Ф.



Буйнов Г.Н.



Спорник Н.М.



Ларионов Н.П.



Бекетова А.К.



Черных В.Т.



Рафиков Р.А.

ки. По сравнению с традиционной, эхо-голография использует более общий принцип записи и восстановления волновых фронтов, т.к. голограмма содержит память о волновых фронтах, порядке подачи объектной и опорной волн в регистрирующую среду, а также о величине задержки объектной волны относительно опорной. Регистрирующая среда является своеобразным «волновым мостом», связывающим во времени и пространстве волновые характеристики оптических полей накачки.

Формирование динамических эхо-голограмм в многоуровневых атомных системах открывает более широкие возможности для выполнения различных преобразований волновых фронтов света. Это становится особенно важным при переходе от одних длин волн к другим или, например, из оптического диапазона в акустический, и наоборот. Акустооптическое преобразование фронтов в эхо-голографии позволяет визуализировать информацию, заложенную в акустической волне. Например, в ситуации, когда подаётся сначала акустическая плоская волна, по-

том акустическая объектная, а затем плоская световая, волновой фронт стимулированного фотонного эха повторяет форму фронта акустической волны.

Эхо-голография позволяет осуществить запись и полное восстановление информации о характере быстропротекающих процессов, исследовать релаксационные и спектроскопические характеристики атомных переходов с целью установления фундаментальных закономерностей взаимодействия когерентного излучения с веществом, внести новые возможности в разработку оптической квантовой памяти и создание оптических компьютеров.

Вопрос формирования интерферограмм разнесёнными во времени волнами имеет самостоятельное научное значение. В теории для получения интерферограмм задержка между интерферирующими лучами не должна превышать длину когерентности применяемого источника излучения. При наличии фазовой памяти регистрирующей среды это ограничение снимается, что позволяет внести коррективы в теорию интерференции и



*Салахов
Мякзюм Халимуллович*



*Хайбуллин
Ильдус Бариевич*



*Самарцев
Виталий Владимирович*

даёт новый стимул развитию интерферометрической техники.

Кроме ГИПО, голографические исследования и разработки в Казани были сосредоточены и активно развивались в ЦКБ «Фотон» (проектные работы – **И.А. Камалов, А.А. Антонов, М.Б. Бланк, В.С. Смирнов, Е.И. Рубан**), на КОМЗе (организация серийного выпуска разработанных в ГИПО приборов). В Казанском физико-техническом институте Казанского научного центра РАН успешно решались теоретические проблемы оптической голографии (динамическая голография, эхо-голография, лазерный «отжиг», упрочнение рабочих поверхностей голограммных элементов для копирования рельефа – **И.Б. Хайбуллин, В.В. Самарцев, А.А. Калачев, И.А. Файзрахманов, С.А. Моисеев, В.С. Лобков, Р.Х. Макаева**).

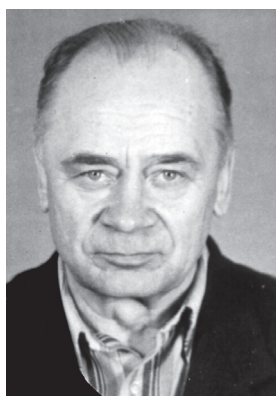
В 1970-1980-х годах в организации КазНИИТехФотоПроект ПО «Тасма» под ру-

ководством **Н.С. Гафуровой** и **А.В. Борина** выполнялись работы по созданию различных типов фоточувствительных плёночных материалов для голографии. Это высокоразрешающие плёнки типа ФПГ-В и высокочувствительные плёнки ФГ-КЧ. Они широко использовались специалистами ГИПО (**Н.М. Спорник, А.К. Бекетова, Л.Т. Мустафина, И.Н. Зелинский, В.Т. Черных, С.Л. Бучинская, Н.П. Ларионов, Т.А. Лукина, Р.А. Рафиков, Ф.А. Саттаров, Т.Б. Сидорова, А.Ф. Скочилов, Р.К. Теплова, Н.М. Шигапова**) в различных вариантах голографических интерферометров, в том числе при их серийном изготовлении на КОМЗе [12], а также для получения физических голограммных оптических элементов [13].

Казанский государственный университет с развитыми в период эвакуации в Казань АН СССР в годы войны различными направле-



*Антонов
Андрей Александрович*



Смирнов В.С.



*Рубан
Елена Ивановна*



*Беляков
Юрий Матвеевич*

ниями оптической спектрометрии, взял на себя множество проблем современной теоретической оптики, в том числе некоторые вопросы теории основ голографии (**А.И. Фишман, М.Х. Салахов** – в настоящее время Президент АН РТ).

В Казанском национальном исследовательском техническом университете имени А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ) ведутся начатые ранее в ГИПО разработки малогабаритных спектральных приборов с неклассическими дифракционными решетками (**Н.К. Павлычева**). На Казанском заводе «Союз» совместно с ГИПО успешно проводится комплекс исследований, направленных на оптимизацию резонатора мощного ИК-лазера (**Ю.М. Беляков**). Ряд мелких фирм в Казани ведёт разработки и серийно выпускает защитные голограммы и т.п.

На базе нескольких кафедр КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева ведётся подготовка специалистов – инженеров по специальностям «оптико-электронные системы», «радиоэлектронные и квантовые системы», «телекоммуникационные системы», на уровне профессоров (А.Ф. Белозёров, А.В. Лукин) читались отдельные курсы лекций и проводятся лабораторные работы по голографии, создана и функционирует совместная лазерно-голографическая лаборатория.

Проблемы когерентной оптики и голографии отдельными частями входят в программы лекционных курсов, читаемых в Казанском (Приволжском) федеральном университете.



*Павлычева
Надежда Константиновна*

Казанская школа голографистов, работавшая под общим научным руководством академика Ю.Н. Денисюка, насчитывала более 50 специалистов с учеными степенями доктора и кандидата наук. По направлению «голография» защищены 43 диссертации (докторских и кандидатских), опубликованы 6 монографий, свыше 500 научных статей и тезисов докладов, получены свыше 250 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Следует отметить, что в 1960-х начале 1970-х годов в ГИПО была создана технология изготовления и репликации нарезных дифракционных решеток (неоценимый вклад в ее развитие внес **С.А. Стрежнев**). Ее апофеозом стало строительство уникального здания (сдано в эксплуатацию в 1976 году с подземной, на отметке 12 метров, вибро- и термоизолированной лабораторией – $\Delta = \pm 0,01$ мкм, $\Delta t = \pm 0,005^\circ\text{C}$ – площадью 1,7 тыс. м²), ставшего впоследствии технологической базой для исследований и производства дифракционной, голограммной и асферической оптики [1]. Проектная мощность производства: 500 нарезных, 500 голограммных, 7500 реплик решеток в год). Если к 1963 году спектроскописты СССР за 12 лет получили от ГОИ около 1400 дифракционных решеток, то только в период с 1981 по 1996 гг. 650 потребителям страны из ГИПО были поставлены 129,1 тысяча дифракционных нарезных и голограммных решеток и копий, за 2010-2015 гг. – изготовлены 300 шт. синтезированных голограммных оптических эле-



Мустафин
Камиль Сабирович



Белозёров
Альберт Федорович



Штырков
Евгений Иванович



Лукин
Анатолий Васильевич



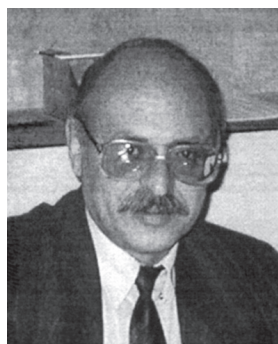
Спорник Н.М.



Бажанов
Юрий Вадимович



Павлычева
Надежда Константиновна



Мохунь И.И.



Андрианов
Сергей Николаевич

Рисунок 1.

Казанская школа голографистов ГИПО.

Сотрудники, защитившие докторские диссертации по голографической тематике

ментов. Экспорт решеток и копий составил около 25 тысяч штук.

На рис. 1 приведены фотографии учёных, защитивших докторские диссертации по голографической тематике ГИПО.

Рис. 3 и 4 показывают наличие научных и человеческих связей представителей Казанской голографической школы (профессор

Белозёров А.Ф., начальник ЦКБ «Фотон» **Краснов А.В.** с корифеями мировой оптики и голографии).

Казанская школа голографистов продолжает активно действовать. К одному из важнейших таких действий необходимо отнести проведение в г. Казани 12-15 октября 2015 года XII-ой Международной научно-прак-



Рисунок 2.

Коллектив лаборатории теневого и интерференционных приборов Государственного института прикладной оптики



Рисунок 3.

Основоположники голографии академик Ю.Н. Денисюк и профессор Эммет Лейт. 2002 год



Рисунок 4.

Профессор Эмиль Вольф (в центре). 1998 год

тической конференции «Голография. Наука и практика. ГОЛОЭКСПО – 2015». Базовой основой конференции стали разработки действующих лабораторий, кафедр и групп АО «НПО ГИПО» и КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева. В конференции, проходившей в здании института новых технологий КНИТУ-КАИ, приняли участие свыше 90 специалистов из Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Молдова, Кыргызской Республики, Литовской Республики, Греческой Республики, Республики Индия; общее количество представленных докладов – 105 (рекордное количество докладов на всех конференциях «ГОЛОЭКСПО»), в том числе пленарных – 13, секционных – 43, стендовых – 49, из них специалистами АО «НПО ГИПО» прочитаны 2 пленарных и 7 секционных докладов, предоставлены 9 стендовых докладов.

Авторы признательны Р.Р. Юсуповой и Л.А. Тепловой за большую помощь при оформлении материалов статьи и подготовке к публикации.

Список литературы:

1. *Белозеров А.Ф.* Оптика России. Очерки истории и развития. Казань: Центр инновационных технологий. 2012. – т.1. – 604 с. 2013. – т.2. – 612 с. – т.3 – 100 с.
2. *Мирошников М.М.* Выдающиеся русские учёные М.В. Ломоносов, Д.С. Рождественский, С.И. Вавилов и научные школы Государственного оптического института. Монография – С-Пб: РНО СП(б) ГУ ИТМО, 2007. – 150 с.
3. *Мирошников М.М., Мирзоева Л.А., Захаренков В.Ф.* и др. Целенаправленные фундаментальные исследования в Государственном оптическом институте. – НПК ГОИ им. С.И. Вавилова. – СП(б): ГУАП, 2009. – 100 с.
4. *Розанов И.Н., Стаселько Д.И.* Полвека новой оптики в России: лазеры, нелинейная оптика и оптическая голография. Доклад на памятном юбилейном заседании 19 октября 2011 г. ФГУП «НПК ГОИ им. С.И. Вавилова.
5. *Gabor D.* Nature 161,777 (1948)
Gabor D. Proc.Roy.Soc. (London) A197, 454 (1949). Gabor D. Proc. Phys. Soc. B64, 449 (1951).
6. *Leith E.N., Upatnieks J.* JOSA 52, 1154 (1962).
Leith E.N., Upatnieks J. JOSA 53, 1377 (1963).
Leith E.N., Upatnieks J. JOSA 54, 1295 (1964).
7. *Денисюк Ю.Н.* Принципы голографии. (Ленинград, 1979, 124 с.); Denisyuk Yu.N., «My Way in Holography», Leonardo, 25, N5, 425 (1992); Шушурин С.Ф. УФН 105, 145 (1971).
8. *Денисюк Ю.Н.* ДАН СССР 144, 1275 (1962); Денисюк Ю.Н. Опт. и спектр. 15, 523 (1963); Денисюк Ю.Н. «Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения» диссертация на соискание степени кандидата физ.- мат. наук (Ленинград, 1963, 133 с.).
9. Proceedings of SPIE V.4737, (2003); Сборник трудов Всероссийского семинара «Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии», Санкт-Петербург, 2007, 300 с.
10. *Стаселько Д.И.* Оптическое общество им. Д.С. Рождественского. Юрий Николаевич Денисюк – основоположник трёхмерной оптической голографии. Как это было. К пятидесятилетию открытия физического явления. Юрий Николаевич Денисюк, лаборатория голографии ГОИ и начало голографического движения в стране.
11. *Лукин А.В., Штырков Е.И.* Лазерно-голографическая предыстория ГИПО. В сб. «Как это было», часть 1, ФИАН, М. 2006. с.312-313 (Воспоминания создателей отечественной лазерной техники)
12. *Белозеров А.Ф.* Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. им. А.Н. Туполева – 2007. 747 с.
13. *Лукин А.В.* Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т.74. № 1. С. 80–87.
14. *Слюсарев Г.Г.* Оптические системы с фазовыми слоями. ДАН СССР, 1957, т.113. с. 780-783.
15. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970. с 856-859.
16. *Штырков Е.И.* Оптическая эхо – голография. Оптика и спектроскопия, 3013, том 114 с. 105 – 114.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ InGaAs

ПОЛЕССКИЙ А.В., СОЛОМОНОВА Н.А., СЕМЕНЧЕНКО Н.А, ХРАБРОВ П.В.

АО «НПО «Орион», г. Москва
МГТУ им. Н.Э.Баумана

E-mail: orion@orion-ir.ru

Проведена оценка точности измерения параметров спектральной чувствительности, коэффициента использования и скорости его изменения от температуры эталонного излучателя для фотоприемных устройств на основе InGaAs в зависимости от точности измерения фотосигналов измеряемого и опорного фотоприемных устройств, а также точности измерения спектральной характеристики опорного фотоприемника. Оценка точности с помощью моделирования методом Монте-Карло, показала наличие систематической погрешности при выполнении измерений.

Ключевые слова: точность измерения, спектральная характеристика, матричное фотоприемное устройство, SWIR, InGaAs.

Спектральная характеристика фотоприемного устройства (ФПУ) как узла оптико-электронной системы является крайне важным параметром, определяющим эффективность работы всей системы. Кроме этого, на основе спектральной характеристики рассчитывается коэффициент использования, применяемый для вычисления полезного потока, попадающего на фотоприемное устройство [1] во время измерения его чувствительности и пороговых характеристик [2].

Поэтому погрешность измерения спектральной характеристики может привести как к просчетам в проектировании оптико-электронных систем, так и к завышению/занижению параметров конкретного ФПУ.

В последнее десятилетие в мире наблюдается повышенный интерес к матричным фотоприемным устройствам (МФПУ), работающим в ближнем инфракрасном, или SWIR-диапазоне спектра [3, 4]

По этой причине спектральная характеристика подобных МФПУ и оценка точности ее определения может быть интересна систе-

мотехникам, разрабатывающим перспективные оптико-электронные системы на основе МФПУ.

Для исследования было выбрано МФПУ формата 320x256 на основе InGaAs, работающее в диапазоне спектра 0,9...1,7 мкм, разработанное в АО «НПО «Орион» [5]. Исследования [6] показали, что его характеристики соответствуют мировым аналогам.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Спектральная характеристика МФПУ определяется следующими параметрами:

- границы спектральной характеристики (длины волн по уровню 0.1);
- длина волны, соответствующая максимуму чувствительности;
- коэффициент использования при различных температурах эталонного излучателя, модели абсолютно черного тела (АЧТ);
- изменение коэффициента использования при изменении температуры АЧТ.

Границы спектральной характеристики по уровню 0.1 и длина волны, соответствующая

максимуму чувствительности являются паспортными параметрами МФПУ.

Коэффициент использования исследуемым МФПУ излучения источника необходим при измерении основных фотоэлектрических параметров [1], и его можно вычислить по формуле:

$$\varphi = \frac{\int_0^{\infty} S_{изм}(\lambda) \cdot r_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} r_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (1)$$

где $S_{отн}(\lambda)$ – ОСХ чувствительности;
 $r_{\lambda}(\lambda, T)$ – спектральная плотность потока излучения при температуре T .

Поэтому ошибки измерения спектральной характеристики в первую очередь влияют на точность измерения основных фотоэлектрических параметров: удельной обнаружительной способности, вольтовой чувствительности и порогового потока.

Во время реальных измерений температура АЧТ может быть определена с некоторой погрешностью и это ведет к изменению спектрального состава и мощности излучения, а поэтому и изменение коэффициента использования. Изменение же коэффициента использования при изменении температуры АЧТ влияет на точность определения основных фотоэлектрических параметров.

Методики измерения спектральной характеристики сходны в отечественной [1] и в зарубежной [7] нормативной документации, и реализуют относительную методику.

Практические исследования проводились на основе стенда, подобного описанного в [8], но в варианте исполнения, предназначенном для измерения МФПУ на основе InGaAs.

Вычисление относительной спектральной характеристики МФПУ при проведении измерений осуществляется по формулам

$$S_{измер}(\lambda) = S_{отн_опорн}(\lambda) \cdot \frac{U_{измер}}{U_{опорн}}, \quad (2)$$

$$S_{отн_измер}(\lambda) = \frac{S_{измер}(\lambda)}{S_{измер_max}}, \quad (3)$$

где $U_{измер}$ – сигнал с измеряемого МФПУ;

$U_{опорн}$ – сигнал с опорного ФПУ;

$S_{отн_опорн}(\lambda)$ – спектральная характеристика опорного ФПУ;

$S_{измер}(\lambda)$ – спектральная характеристика измеряемого МФПУ до приведения;

$S_{отн_измер}(\lambda)$ – ОСХ измеряемого МФПУ;

$S_{измер_max}(\lambda)$ – максимальное значение спектральной характеристики измеряемого МФПУ до приведения.

Как видно из выше приведенных формул, основными источниками ошибок при измерении спектральной характеристики являются:

– шум электрического сигнала опорного ФПУ;

– шум электрического сигнала измеряемого МФПУ;

– погрешность спектральной характеристики опорного ФПУ.

Погрешность установки длины волны на выходной щели монохроматора контролировалась по аргоновой лампе и составляла незначительную величину. Наличие вторичного спектра контролировалось путем измерения значения фотосигнала на выходе монохроматора с помощью приемника с известной спектральной характеристикой. Вторичный спектр по результатам данных измерений обнаружен не был.

Исследование точности измерения спектральной характеристики МФПУ диапазона 0,9...1,7 мкм проводилось методом математического моделирования Монте-Карло, который представляет собой численный метод, основанный на получении большого числа реализаций случайного процесса и их последующей обработки [9]. Моделирование проводилось при разных шагах сканирования ОСХ – 30, 18, 4, 2 нм.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ СОБЛЮДЕНИИ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ (НАИХУДШИЙ ВАРИАНТ)

Для расчета использовалось одно из измерений спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs, включающее сигналы с опорного ФПУ, с измеряемого МФПУ и

спектральную характеристику опорного ФПУ (калибровано в ФБУ «РОСТЕСТ-Москва»), при условии, что погрешность измерения спектральной характеристики опорного ФПУ составляет 6% с достоверностью 0,95 (приведено в протоколе калибровки).

Данные величины были использованы как математическое ожидание и в дальнейшем подлежали зашумлению

На основании нормативной документации [1] также вводим допущение, что погрешность измерения сигнала с измеряемого и опорного МФПУ – 7% с достоверностью 0,95, при этом шум обоих ФПУ определяется погрешностью измерения сигнала.

Результатом измерений являются четыре массива данных:

- напряжение сигнала опорного ФПУ;
- напряжение сигнала измеряемого МФПУ;
- спектральная характеристика опорного ФПУ;
- спектральная характеристика измеряемого МФПУ (использовалась для проверки правильности некоторых расчетов).

Длина каждого массива – 450 значений, соответствующих измерениям в диапазоне 800-1700 нм с шагом 2 нм. Графические отображения используемых массивов представлены на рис. 1.

Моделирование точности определения длины волны максимума и границ чувствительности по уровню 0,1, а также коэффициента использования проводилось в программе

MathCad. На схеме процесса моделирования измерения спектральной характеристики, приведенной на рис. 2, стоит обратить внимание на то, что оператор «gnom» – оператор добавления шума с гауссовым распределением, переменная «Coeff» позволяет связать погрешность измерения и СКО шума и определяется из закона распределения Гаусса для вероятности 0,95.

Также стоит обратить внимание на выполнение приведения к единице, т.е. «нормирования» опорной спектральной характеристики после её зашумления. Определение граничных длин волн происходит методом линейной интерполяции.

Результаты моделирования погрешности измерения границ спектральной характеристики по уровню 0,1 и длины волны максимума чувствительности для 1000 «бросков» приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наибольшая случайная погрешность измерения наблюдается для длины волны максимума спектральной чувствительности. Это происходит из-за отсутствия выраженного максимума ОСХ. Также можно сказать, что при уменьшении шага сканирования нет падения систематической составляющей погрешности измерения для длины волны максимума спектральной чувствительности, что объясняется высоким уровнем шумов.

Точность измерения длины волны максимума спектральной чувствительности со-

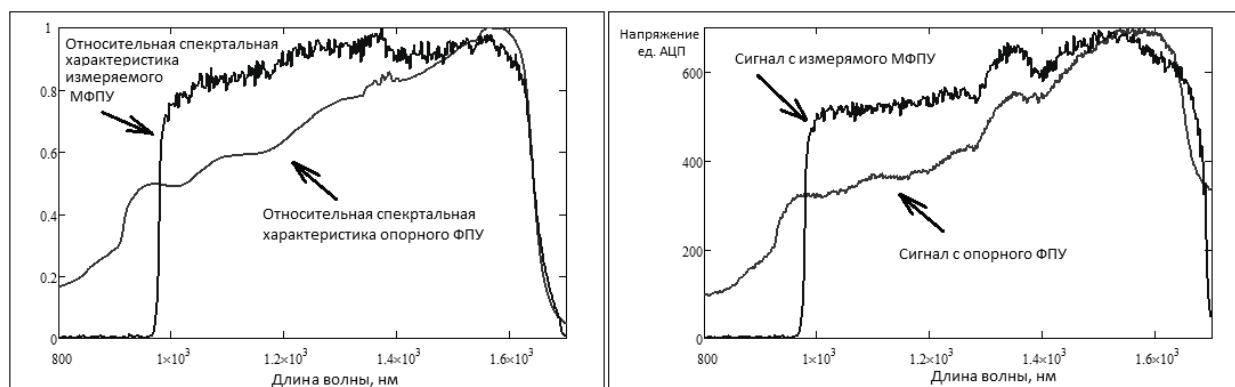


Рисунок 1.
Иллюстрация используемой при моделировании информации

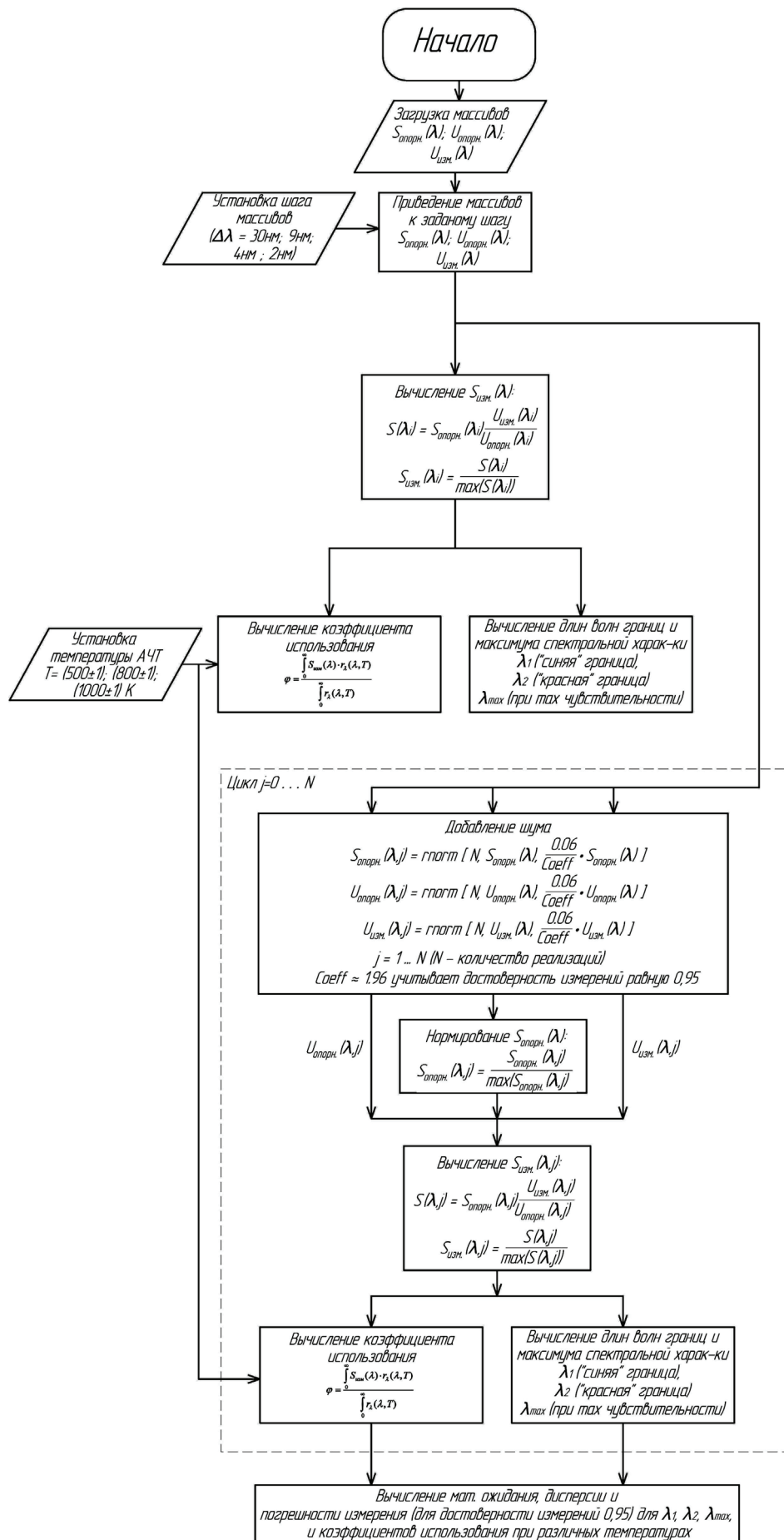


Рисунок 2.
Схема процесса моделирования

Таблица 1.
Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1
и длины волны максимума чувствительности

Шаг сканирования по длине волны	Длина волны максимума спектральной чувствительности			«Синяя» граница спектральной чувствительности			«Красная» граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
	30 нм	1391,0	16,1	1,38	955,5	0,083	1,83	1681,6	0,16
18 нм	1417,9	16,9	3,35	965,2	0,046	0,84	1680,6	0,12	0,053
4 нм	1416,9	15,4	3,27	973,2	0,038	0,017	1678,0	0,12	0,102
2 нм	1410,8	15,3	2,83	973,9	0,048	0,057	1678,5	0,107	0,077
Исходная ОСХ	1372			973,389			1679,754		

* - указано для доверительной вероятности равной 0,95

Таблица 2.
Результаты моделирования точности определения коэффициента использования

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования для температуры:								
	500 К			800 К			1000 К		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. значение	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. значение	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	$2,33 \cdot 10^{-5}$	6,96	4,11	$4,34 \cdot 10^{-3}$	6,29	4,19	0,0209	6,09	4,08
18 нм	$2,32 \cdot 10^{-5}$	6,42	4,52	$4,31 \cdot 10^{-3}$	6,08	4,85	0,0208	5,96	4,54
4 нм	$2,20 \cdot 10^{-5}$	5,12	9,46	$4,11 \cdot 10^{-3}$	5,00	9,27	0,0195	4,95	10,51
2 нм	$2,17 \cdot 10^{-5}$	4,99	10,7	$4,05 \cdot 10^{-3}$	4,95	10,6	0,0198	4,99	9,13
Исходная ОСХ	$2,43 \cdot 10^{-5}$			$4,53 \cdot 10^{-3}$			0,02179		

* - указано для доверительной вероятности равной 0,95

ставляет около $\pm 17\%$. Ошибка измерения «синей» границы спектральной чувствительности доходит до $\pm 1,85\%$, «красной» границы составляет примерно $\pm 0,19\%$.

Результаты моделирования точности определения коэффициента использования для 1000 «бросков» приведены в табл. 2.

Для используемых исходных данных, наблюдается значительная систематическая погрешность измерения, которая увеличивается с уменьшением шага сканирования.

Данный эффект можно объяснить отсутствием ярко выраженного максимума и значительными величинами шумов, при наличии которых коэффициент использования получается меньше реального, что приводит к занижению вольтовой чувствительности и удельной обнаружительной способности МФПУ. Погрешность вычисления коэффициента использования не выходит за пределы $\pm 12\%$ при отсутствии ошибки установки температуры АЧТ.

Таблица 3.

Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ

Шаг сканирования по длине волны	Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ, %					
	Для 500К – коэффициент использования принят равным 100%		Для 800К – коэффициент использования принят равным 100%		Для 1000К – коэффициент использования принят равным 100%	
	499К	501К	799 К	801К	999К	1001К
30 нм	97,11	102,89	99,11	101,11	99,4	100,6
18 нм	97,11	102,89	99,11	101,11	99,4	100,6
4 нм	97,01	102,99	98,85	100,92	99,38	100,57
2 нм	96,98	103,02	99,07	101,16	99,38	100,58
Исходная ОСХ	97,12	102,88	98,9	100,88	99,4	100,6

Таблица 4.

Результаты моделирования точности измерения границ по уровню 0,1 и длинны волны максимума чувствительности для реальных условий

Шаг сканирования по длине волны	Длина волны максимума спектральной чувствительности			«Синяя» граница спектральной чувствительности			«Красная» граница спектральной чувствительности		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
	30 нм	1388,2	13,3	1,18	955,3	0,05	1,85	1682,4	0,10
18 нм	1435,1	14,9	4,60	965,0	0,03	0,86	1681,3	0,07	0,092
4 нм	1412,2	13,9	2,93	973,0	0,02	0,034	1679,1	0,07	0,039
2 нм	1417,1	13,9	3,23	973,6	0,04	0,022	1679,3	0,05	0,027
Исходная ОСХ	1372			973,389			1679,754		

* - указано для доверительной вероятности равной 0,95

Зависимость измерения коэффициента использования от температуры АЧТ представлена в табл. 3.

Наиболее важным выводом из табл. 3 является то, что при увеличении температуры АЧТ на этапе измерения фотоэлектрических параметров требования к точности установки температуры уменьшаются. Также можно сказать, что на изменение коэффициента использования от температуры АЧТ практически не влияет шаг сканирования.

Учитывая, что при последующих измерениях используется АЧТ модели Micron M360 с точностью по температуре $\pm 1^\circ\text{C}$ и погрешностью считывания $\pm 0,2\%$, (для 500 К погрешность составляет $\pm 2^\circ\text{C}$, для 800К составляет $\pm 2,6^\circ\text{C}$, а для 1000К составляет $\pm 3^\circ\text{C}$) можно дать рекомендацию об измерении параметров на МФПУ на основе InGaAs при температуре АЧТ 1000К, в этом случае погрешность измерения, вызванная погрешностью поддержания температуры, составит $\pm 1,5\%$.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
СПЕКТРАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
С РЕАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
СИГНАЛОВ И ШУМОВ**

В реальности точность измерения сигнала в МФПУ на основе InGaAs всегда выше, чем требуемая согласно [1]. Отношение сигнал/шум МФПУ с учетом коммутации, оцифровки и передачи сигнала в максимуме спектральной чувствительности составляет около 500, схожая ситуация наблюдается и с опорным ФПУ. Погрешность измерения спектральной характеристики опорного ФПУ составляет 6% с достоверностью 0,95. В табл. 4 и 5 приведены данные расчетов описанного случая.

Для реальных условий точность определения границ чувствительности является высокой и увеличивается с уменьшением шага сканирования. Точность определения длины волны максимума спектральной чувствительности возросла по сравнению с ранее рассмотренным случаем.

Для реальных условий точность измерения коэффициента использования от температуры АЧТ составляет около $\pm 4,5\%$. Также при уменьшения шага сканирования возрастает систематическая ошибка, однако она не является доминирующей как в случае больших шумов.

Данные о зависимости изменения коэффициента использования от температуры АЧТ для реальных условий в статье не приводятся, поскольку они с высокой точностью совпадают с результатами, полученными при соблюдении условий [1].

ВЫВОДЫ

На основе разработанной математической модели были проведены оценки точности измерения как для условий, описанных в нормативной документации, так и для реальных условий.

При измерении относительной спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs для диапазона 0,9...1,7 мкм с соблюдением условий к точности измерения сигналов с опорного ФПУ и измеряемого МФПУ (отношение сигнал/шум составляет примерно 14,3), описанных в нормативной документации ошибка измерения граничных значений длин волн по уровню 0,1 составляет менее $\pm 2\%$. Основной проблемой измерений является систематическая ошибка в определении коэффициента использования, достигающая 10,7%.

При измерении в реальных условиях относительной спектральной характеристики МФПУ на основе InGaAs (отношении сигнал/шум равно 500) точность определения

**Таблица 5.
Результаты моделирования точности определения коэффициента использования
для реальных условий**

Шаг сканирования по длине волны	Коэффициент использования для температуры								
	500 К			800 К			1000 К		
	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %	средн. знач.	случ. погр. %*	сист. погр. %
30 нм	$2,44 \cdot 10^{-5}$	4,15	0,41	$4,54 \cdot 10^{-3}$	3,83	0,22	0,0218	3,74	0,22
18 нм	$2,44 \cdot 10^{-5}$	3,62	0,41	$4,54 \cdot 10^{-3}$	3,51	0,22	0,0218	3,45	0,13
4 нм	$2,36 \cdot 10^{-5}$	3,01	2,47	$4,40 \cdot 10^{-3}$	2,96	2,87	0,0216	2,95	2,89
2 нм	$2,34 \cdot 10^{-5}$	2,66	3,70	$4,37 \cdot 10^{-3}$	2,64	3,52	0,0210	2,63	3,58
Исходная ОСХ	$2,43 \cdot 10^{-5}$			$4,53 \cdot 10^{-3}$			0,02179		

* - указано для доверительной вероятности равной 0,95

граничных значений длин волн по уровню 0,1 составляет менее 2% для шага сканирования 30 нм, и падает до 0,1% и менее при измерении для шага 4 нм и менее. Точность измерения коэффициента пересчета составляет $\pm 4,5\%$.

С целью минимизации ошибок измерения основных фотоэлектрических параметров МФПУ на основе InGaAs рекомендуется проводить измерения при температуре АЧТ 1000К, в этом случае погрешность измерения, вызванная погрешностью поддержания температуры, составит $\sim 1,5\%$, а общая погрешность измерения основных фотоэлектрических параметров, вызванная погрешностью измерения спектральной характеристики, не превысит $\pm 4,8\%$ при условии правильной юстировки измеряемого МФПУ относительно выходной щели монохроматора.

Список литературы:

1. ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 65 с.
2. Балиев Д.Л., Бедарева Е.А, и др. Автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs // *Прикладная физика*. 2014. №6. С. 93.

3. Бурлаков И.Д., Гринченко Л.Я. // Детекторы коротковолнового ИК-диапазона на основе InGaAs (обзор) // *Успехи прикладной физики*. 2014. Том 2, № 2. Стр. 131

4. A. Rogalski. Progress in focal plane array technologies (Review) // *Progress in Quantum Electronics* 36 (2012), p. 342–473

5. Яковлева Н.И., Болтарь К.О и др. Матричные фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного диапазона спектра с лавинным усилением сигнала на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs // *Прикладная физика*. 2014. №2. Стр. 45

6. Балиев Д.Л., Лазарев П.С., Болтарь К.О. Исследование фотоэлектрических параметров фотоприемного модуля формата 320×256 на основе InGaAs // *Прикладная физика*. 2014. №5. С. 54.

7. Photovoltaic devices – Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device. IEC 60904-8 (МЭК 60904-8:1998)

8. Деомидов А. Д., Кононов М. Е. и др. Автоматизированная установка для исследования относительной спектральной характеристики матричного фотоприемного устройства ультрафиолетового диапазона спектра // *Прикладная физика*. 2014. №6. С. 87.

9. Ермаков С.М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы, М.: ФИЗМАТЛИТ, 1975. 2-е издание.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВЯЗИ НА ДАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

КОЗЛОВ К.В., ХАМИДУЛЛИН К.А.

АО «НПО «Орион», г. Москва

E-mail: orion@orion-ir.ru

В статье рассмотрен вопрос влияния величины фотоэлектрической связи матричных фотоприемных устройств на дальность обнаружения, распознавания и идентификации для различных оптико-электронных систем. Приведены результаты моделирования для оптико-электронных систем бронетанковой техники.

Ключевые слова: фотоэлектрическая связь, оптико-электронные системы, дальность работы, матричное фотоприемное устройство.

Значение оптико-электронных систем (ОЭС) для оборонной техники сложно переоценить. Прицельные комплексы, морские системы, прицелы для бронетанкового вооружения и спутниковые разведывательные аппараты – вот далеко не полный перечень вооружений, в которых используются ОЭС. Большинство современных ОЭС работают на основе матричных фотоприемных устройств (МФПУ).

МФПУ обладают рядом преимуществ, но также им присущи специфические свойства, среди которых стоит отметить фотоэлектрическую связь (ФЭС) между его каналами.

ФЭС – явление, при котором происходит появление фотосигнала на соседних фоточувствительных площадках МФПУ при засветке единичной площадки [1]. ФЭС существенно влияет на такой важный показатель, как модуляционная передаточная функция (МПФ) МФПУ [2]. В ОЭС МПФ отдельных звеньев перемножаются между собой (в линейном приближении), поэтому падение МПФ МФПУ ведет к падению МПФ ОЭС в целом.

Расчет МПФ МФПУ с ФЭС проводится с использованием теории линейной фильтрации [3], являющейся ветвью Фурье-анализа, используемого для изучения реакции на

сигнал линейных инвариантных устойчивых систем. Ниже приведен расчет МПФ МФПУ.

РАСЧЕТ МПФ МФПУ С ФЭС

Импульсная реакция идеального МФПУ описывается функцией

$$U(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right),$$

где a и b – размер ФЧЭ по x и y соответственно.

Фурье-преобразование для импульсной функции идеального МФПУ:

$$\tilde{U}(v_x, v_y) = a \cdot b \cdot \text{sinc}(\pi \cdot a \cdot v_x) \cdot \text{sinc}(\pi \cdot b \cdot v_y)$$

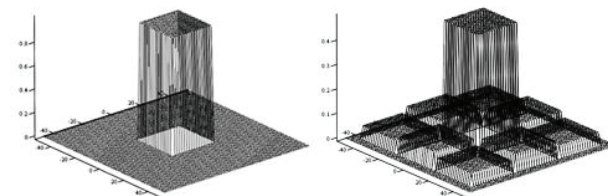


Рисунок 1.

Иллюстрация импульсной функции идеального МФПУ и МФПУ с ФЭС

При наличии ФЭС необходимо рассматривать совокупность импульсных откликов центрального ФЧЭ и соседних. Выражение добавленной импульсной реакции для соседнего пикселя, смещенного относительно центрального на x_0 имеет следующий вид

$$F \left[\text{rect} \left(\frac{x}{a} - x_0 \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{y}{b} \right) \right] =$$

$$= a \cdot b \cdot \text{sinc}(\pi \cdot a \cdot v_x) \cdot \text{sinc}(\pi \cdot b \cdot v_y) \cdot \exp(-i \cdot 2 \cdot \pi \cdot v_x \cdot x_0)$$

Стоит отметить, что расчет проводится в предположении о том, что все вертикальные

и горизонтальные соседние пиксели имеют одинаковый коэффициент ФЭС по отношению к центральному $K_{\text{ФЭС}}$, а все диагональные пиксели – $\frac{K_{\text{ФЭС}}}{\sqrt{2}}$.

Также не был принят во внимание тот факт, что для частоты, превышающей частоту Найквиста, необходимы более сложные методы расчета МПФ. Подобное упрощение обосновано – в дальнейшем будут рассматриваться средние частоты.

После сложения и преобразования выражений для отдельных ФЧЭ получаем выражение для МПФ с коэффициентом ФЭС $K_{\text{ФЭС}}$

$$\begin{aligned} \tilde{U}_{\text{ФЭС}}(v_x, v_y) = & a \cdot b \cdot \text{sinc}(\pi \cdot a \cdot v_x) \cdot \text{sinc}(\pi \cdot b \cdot v_y) \cdot \left[1 - 4 \cdot K_{\text{ФЭС}} - \frac{4 \cdot K_{\text{ФЭС}}}{\sqrt{2}} + \right. \\ & \left. + 2 \cdot K_{\text{ФЭС}} \cdot [\cos(2 \cdot \pi \cdot v_x \cdot x_0) + \cos(2 \cdot \pi \cdot v_x \cdot y_0)] + \frac{4 \cdot K_{\text{ФЭС}}}{\sqrt{2}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v_x \cdot x_0) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot v_x \cdot y_0) \right] \end{aligned}$$

Наличие ФЭС ведет к падению МПФ, что проиллюстрировано на рис. 2.

Падение МПФ, как можно видеть, довольно велико – при отсутствии ФЭС уровню контраста 0,4 соответствовала пространственная частота 52 пар линий/мм, а при величине ко-

эффициента ФЭС 7% уже 23 пар линий/мм, падение почти на 55%.

Однако падение МПФ МФПУ неочевидный критерий оценки влияния ФЭС на качество ОЭС, так как МФПУ лишь узел, хоть и важный. На качество ОЭС влияет также

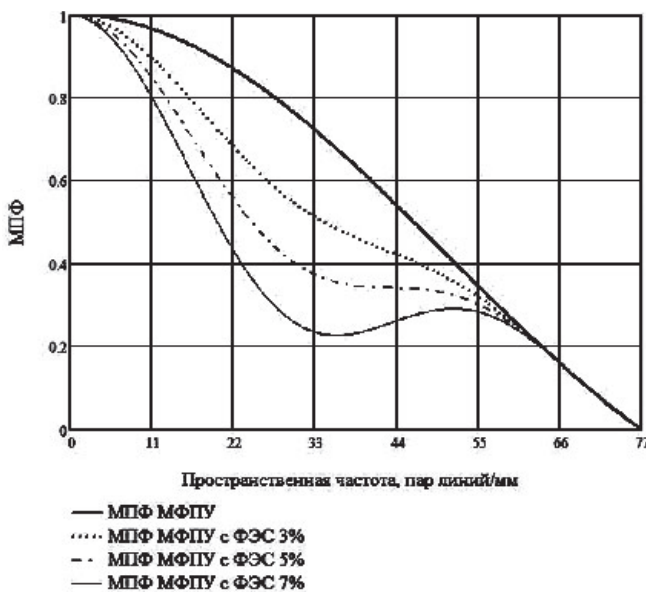


Рисунок 2.

МПФ МФПУ с ФЭС

(размер пикселя 13 мкм, шаг пикселя 15 мкм)

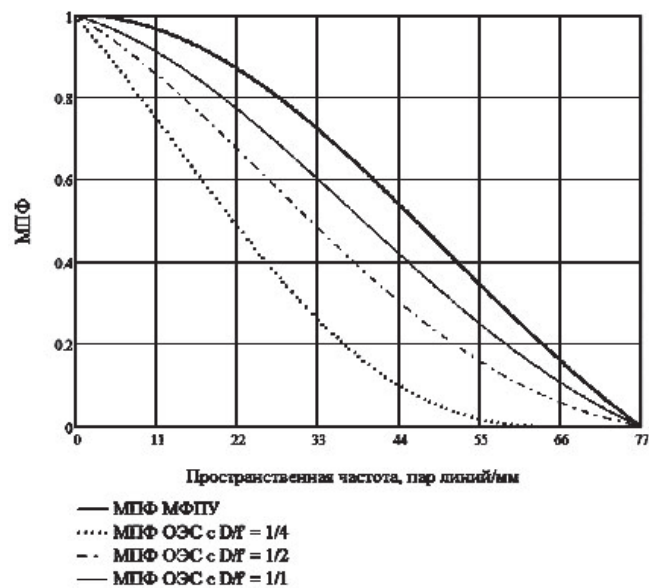


Рисунок 3.

МПФ МФПУ и ОЭС (13 мкм, 15 мкм, 4 мкм)

передаточная функция оптической системы. МПФ ОЭС является произведением МПФ ее составляющих частей – оптической системы и МФПУ.

На рис. 3 представлены графики МПФ МФПУ с шагом матрицы 15 мкм и МПФ ОЭС с различными оптическими системами (качество ограничено дифракцией) для среднего ИК диапазона.

РАСЧЕТ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ, РАСПОЗНАВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОЭС С ФЭС

В качестве критерия качества ОЭС будет рассматриваться изменение дальности обнаружения, распознавания и идентификации (см. рис. 4).

Под обнаружением понимается определение наличия цели в поле зрения; распознавание – определение типа обнаруженной цели (человек, автомобиль, танк, грузовик, и т.д.),

идентификация – определение типа уже распознанной цели.

Для определения дальностей обнаружения, распознавания и идентификации используют критерий Джонсона [4]. Он определяет, какое количество периодов штриховой миры должно приходиться на изображение критического размера объекта для решения задач обнаружения, распознавания и идентификации (см. рис. 5). Критический размер $h_{кр}$ индивидуален для разных типов объектов.

Количество периодов эквивалентной миры, необходимое для решения задачи с заданной вероятностью указано в таблице 1. [5].

Рассчитаем дальность работы системы. Пусть количество периодов штриховой миры, необходимое для успешного выполнения задачи с заданной вероятностью составляет N . Тогда, зная количество пикселей, необходимых для разрешения одного периода миры M и зная шаг пикселя pp , можно опре-

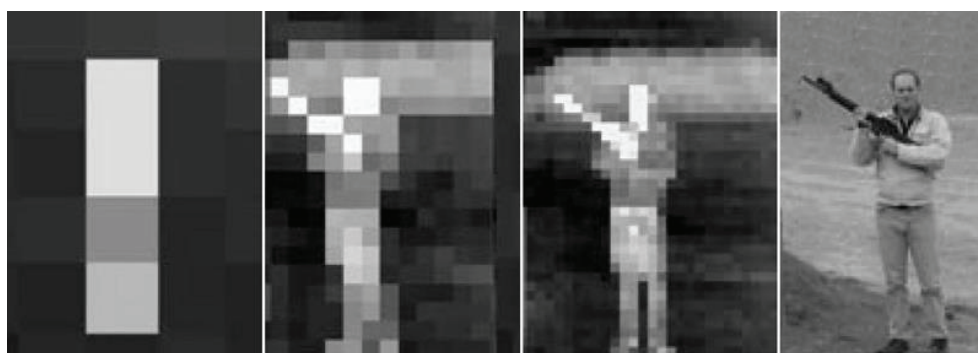


Рисунок 4.

Иллюстрация обнаружения, распознавания и идентификации

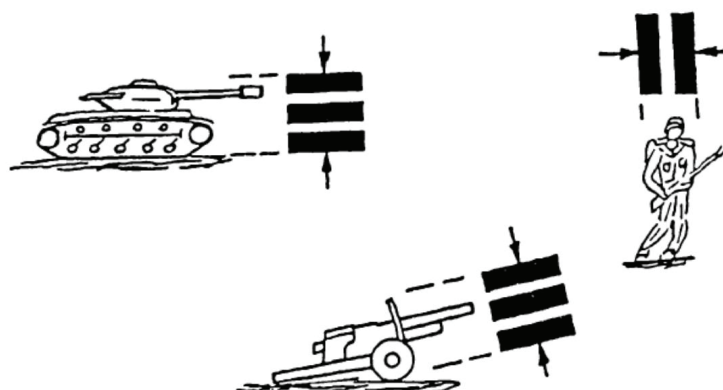


Рисунок 5.

Иллюстрация понятия эквивалентной штриховой миры

Таблица 1.
Количество периодов штриховой миры

Задача	Вероятность 50 %	Вероятность 70 %	Вероятность 90 %
Обнаружение	0,75	0,94	1,34
Распознавание	3	3,75	5,37
Идентификация	6	7,5	10,7

делить необходимый размер изображения h'

$$h' = M \cdot N \cdot pp \quad (5)$$

Зная размер изображения h' и фокусное расстояние оптической системы ОЭС f' , можно рассчитать дальность обнаружения, распознавания и идентификации L

$$L = h_{кр} \cdot \frac{f'}{h'} = h_{кр} \cdot \frac{f'}{M \cdot N \cdot pp} \quad (6)$$

Неизвестным остается параметр M , определяющий количество пикселей, необходимых для разрешения одного периода миры. Обычно его принимают равным двум, однако для реальных систем корректней будет определить его, исходя из МПФ всей системы, принимая во внимание соотношение

$$\nu = \frac{N}{h'} = \frac{1}{M \cdot pp}$$

Параметр M определяет, на какой пространственной частоте происходит решение задачи. Пространственная частота, в свою очередь, определяет контраст. Будем считать, что для различения одного периода миры достаточно, чтобы величина контраста была 0,4.

Существует несколько методик расчета дальности обнаружения, распознавания и идентификации. В [6] приведено сравнение двух таких методов и обоснована целесообразность применения критерия Джонсона с использованием геометрических характеристик каналов.

Однако стоит отметить, что расчеты дальности в данной работе оценочны, поэтому дальности обнаружения, распознавания и идентификации должны рассматриваться как относительные величины, служащие для изучения влияния ФЭС на качество ОЭС.

Реальные расчеты дальности должны учитывать гораздо больше параметров – МПФ остальных трактов ОЭС, энергетические и спектральные характеристики фона и цели, пропускание атмосферы, квалификацию оператора и прочее.

Рассмотрим реальные ОЭС для разных спектральных диапазонов – среднего инфракрасного, дальнего инфракрасного и ультрафиолетового диапазона спектра.

СИСТЕМЫ ДЛЯ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

В качестве ОЭС для среднего ИК диапазона рассмотрим танковый прицельный комплекс «Агат-МДТ», в котором используется МФПУ ФЭМ14М [7].

Интересующие нас параметры следующие: относительное отверстие 1/4 (определяется охлаждаемой диафрагмой МФПУ), фокусное расстояние 200 мм, спектральный диапазон работы 3-5 мкм. Размер пикселя 13 мкм, шаг 15 мкм. МПФ МФПУ описывается графиком, приведенном на рис. 2.

Для среднего и дальнего ИК диапазонов, по ряду причин, качество оптической системы ограничено только дифракционными явлениями.

Целью будем считать танк Т-72. Высота танка Т-72 составляет 2200 мм.

На рис. 6 изображена МПФ описанной ОЭС.

Из данной зависимости можно определить частоту работы системы при контрасте одного периода миры 0,4. Исходя из полученной частоты можно определить M и далее, по приведенной ранее формуле расчета дальности обнаружения, распознавания и идентификации. Сведем полученные данные в таблицу 2.

Таблица 2.

Дальности обнаружения, распознавания и идентификации объекта ОЭС среднего ИК диапазона спектра на основе МФПУ с относительным отверстием 1/4

ФЭС, %	Частота при контрасте 0,4, пар линий/мм	Дальность обнаружения, вероятность 70 %, м	Дальность распознавания, вероятность 70 %, м	Дальность идентификации, вероятность 70 %, м
0	26,00	12 170	3 051	1 525
1	24,40	11 420	2 863	1 431
2	22,80	10 670	2 675	1 338
3	21,35	9 994	2 505	1 253
4	20,00	9 362	2 347	1 173
5	18,80	8 800	2 206	1 103

Падение дальности при коэффициенте ФЭС 5% составляет 27,7%.

Представляет интерес зависимость дальности от относительного отверстия, а, значит, величины пятна рассеяния объектива (рис. 7).

Очевидно, что рост пятна рассеяния объектива вследствие уменьшения относительного отверстия ведет к падению дальности работы оптико-электронной системы, но также и нивелирует влияние ФЭС. Таким образом, можно сделать вывод, что влияние фотоэлектрической связи сильно зависит от соотношения пятна рассеяния оптической системы и размера фоточувствительного элемента. Проще говоря, чем большую площадь со-

седних пикселей захватывает пятно рассеивания, тем меньше фотоэлектрическая связь влияет на качество ОЭС.

СИСТЕМЫ ДЛЯ ДАЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА СПЕКТРА

В связи с вышесказанным можно предположить, что с ростом длины волны, и, как следствие, пятна рассеяния, будет падать зависимость дальности обнаружения, распознавания и идентификации от коэффициента ФЭС МФПУ.

В качестве ОЭС для дальнего ИК диапазона рассмотрим тепловизионный канал на основе ОЭС Catherine-FC [8].

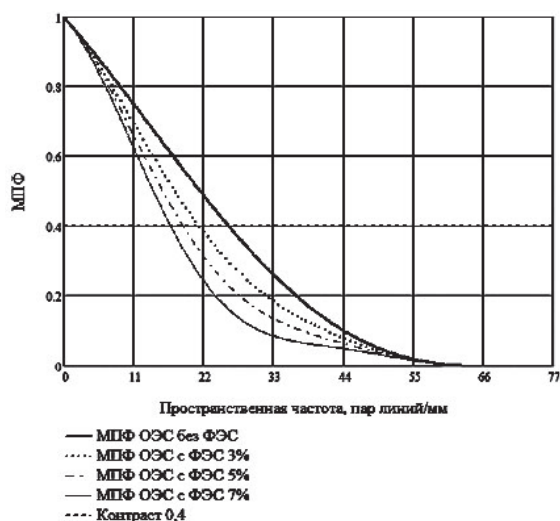


Рисунок 6.
МПФ ОЭС среднего ИК диапазона с ФЭС 3, 5 и 7%

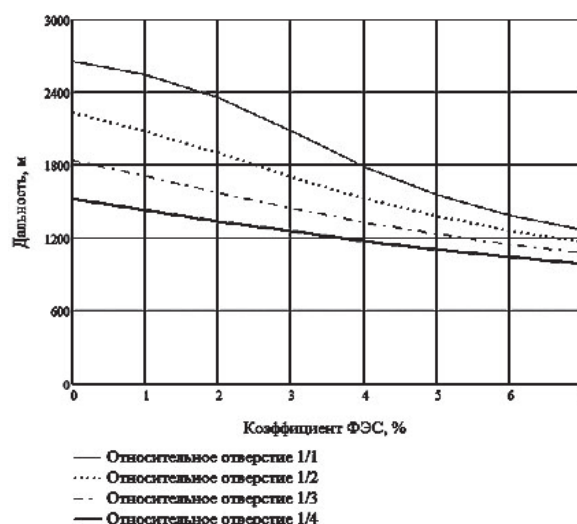


Рисунок 7.
Дальность идентификации в зависимости от ФЭС для ОЭС среднего ИК диапазона с разными относительными отверстиями

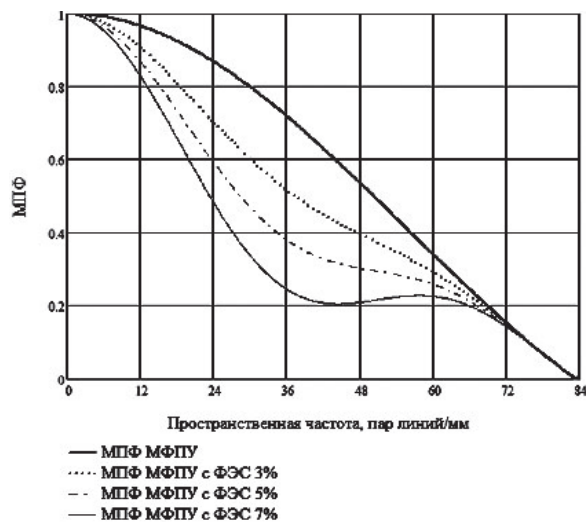


Рисунок 8.
*МПФ МФПУ дальнего инфракрасного
диапазона спектра*

Его параметры: относительное отверстие 1/2.7, фокусное расстояние 185 мм, спектральный диапазон работы 8-10 мкм. Предполагаемое к использованию МФПУ имеет формат 384x288 шаг пикселя 25 мкм, размер пикселя 24 мкм, а с использованием микро-сканирования – формат 768x576, шаг пикселя 12,5 мкм, размер 12 мкм.

Целью также будем считать объект высотой 2200 мм.

График МПФ МФПУ в этом случае приведен на рис. 8.

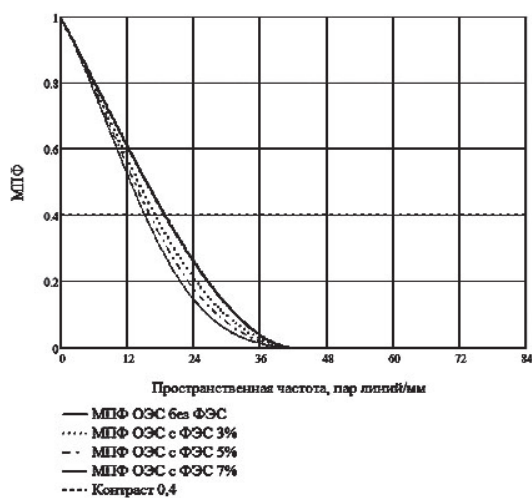


Рисунок 10.
*МПФ ОЭС дальнего инфракрасного
диапазона спектра*

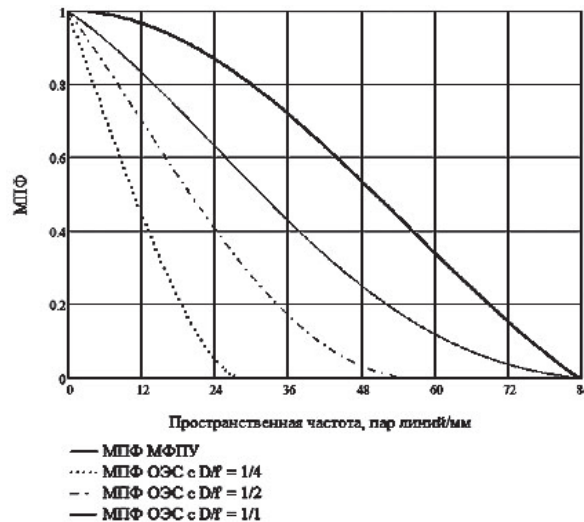


Рисунок 9.
*МПФ МФПУ и ОЭС дальнего инфракрасного
диапазона спектра с разным относительным
отверстием*

На рис. 9 приведены графики МПФ ОЭС дальнего ИК диапазона с разным относительным отверстием в сравнении с МПФ МФПУ.

На рис. 10 изображена МПФ описанной выше ОЭС для дальнего ИК диапазона спектра.

Падение дальности при коэффициенте ФЭС 5% на 14,5%, что является существенно меньшим влиянием

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При расчете влияния ФЭС на дальность и качество работы инфракрасных ОЭС в целом необходимо учитывать передаточную функцию оптической системы и факторы, влияющие на нее (абберации, рабочая длина волны, относительное отверстие охлаждаемого МФПУ). Во многих случаях при разработке требований на МФПУ в части коэффициента ФЭС следует учитывать неодинаковое качество формирования изображения оптической системой на краю и в центре поля зрения.

2. Чем больше отношение размера пикселя к пятну рассеяния оптической системы, тем сильнее влияние ФЭС на качество ОЭС. В современных бронетанковых тепловизионных прицельных комплексах пятно рассеяния оптической системы, а, следовательно, и данного отношение, сильно зависит от величины относительного отверстия охлаждаемого МФПУ.

Таблица 3.

Дальности обнаружения, распознавания и идентификации объекта ОЭС
дальнего ИК диапазона спектра на основе МФПУ с относительным отверстием 1/2,7

ФЭС, %	Частота при контрасте 0,4, пар линий/мм	Дальность обнаружения, вероятность 70 %,м	Дальность распознавания, вероятность 70 %, м	Дальность идентификации, вероятность 70 %, м
0	18,92	8 192	2 053	1 027
1	18,32	7 932	1 988	994
2	17,74	7 681	1 925	963
3	17,18	7 439	1 865	932
4	16,66	7 213	1 808	904
5	16,17	7 001	1 755	877

3. Для повышения качества ОЭС необходимо проводить измерения ФЭС МФПУ.

4. Для измерения ФЭС современных МФПУ, работающих в инфракрасном диапазоне спектра, необходима разработка специальных методик и аппаратуры.

Список литературы:

1. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, ГОСТ 17772, 1988 г.

2. А.В. Полесский, В.Н. Соляков, К.А. Хамидуллин. Влияние фотоэлектрической взаимосвязи в матричных фотоприемных устройствах на модуляционную передаточную функцию // Труды 54-й международной конференции МФТИ, 2011 г., стр. 121-125.

3. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. — М., Мир, 1970 г.

4. John Johnson, «Analysis of image forming sys-

tems» in Image Intensifier Symposium, AD 220160 (Warfare Electrical Engineering Department, U.S. Army Research and Development Laboratories, Ft. Belvoir, Va., 1958), стр. 244–273.

5. John Love. How to assess thermal camera range capability for site design purpose. Photonics online. DRS Technologies, 2014

6. Н.Н. Кулакова, С.В. Мишин. Анализ результатов расчета дальностей обнаружения, распознавания и идентификации тепловизионной системы по двум методикам. Научно-технический журнал «Контенант». 2015 г., Том 14, № 1, стр. 49-53

7. Д.Л. Балиев, К.О. Болтарь, и др. Матричное фотоприемное устройство на основе антимолибдидной матрицы формата 640x512 с шагом 15 мкм. Прикладная физика, 2014, №2, стр. 41-44

8. O.Coclea, C. Rannoua, B. Forestiera, Paul J. Philippe, F. Boisb, Eric M. Costardb, A. Manissadjianc, D. Gohierc. Qwip compact thermal imager: Catherine-XP and its evolutions spie, Defense & Security 2007 - [6542-127], стр. 9, Orlando, 2007 год.

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КАМЕР И ПРИБОРОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОГРАНИЧЕННОЙ НОМЕНКЛАТУРЫ МАРОК СТЁКОЛ

МАЛЬКИН А.А., ФУФУРИН Л.В., ШМИДТ А.И.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: mor3e@mail.ru

В материале представлены результаты применения ограниченной номенклатуры отечественных марок бесцветного оптического стекла [1] при разработке объективов для телевизионных камер и приборов ночного видения.

Ключевые слова: оптическое стекло, объектив.

Формирование и использование минимизированного каталога бесцветного оптического стекла отечественного производства, достаточного для создания оптических систем для современных образцов оптических и оптико-электронных приборов, является важной задачей, решение которой необходимо не только для уменьшения издержек производства оптических материалов, но и для повышения качественных характеристик оптических систем.

Проведённые исследования [2, 3], показали, что при современном развитии компьютерных технологий проектирования оптических систем, можно добиться получения высоких качественных характеристик оптических систем с применением ограниченной номенклатурой марок бесцветного оптического стекла.

Результатом проделанной работы стал минимизированный электронный каталог оптического бесцветного стекла, адаптированный для программы расчёта оптических систем Zemax (OpicStudio).

Ограниченный перечень марок стёкол,

достаточный для проведения большинства расчётов оптических систем, основанных на бесцветном оптическом стекле, показан на рис. 1.

На рис. 1 отмечены марки стёкол, которые согласно [1] при новых разработках к применению не допускаются. Однако, их использование (или использование их аналогов) позволяет проектировать оптические системы с высокими качественными характеристиками.

Указанный каталог включает в себя актуализированные дисперсионные коэффициенты формулы Eytenden 2, позволяющие интерполировать значения показателей преломления в спектральном диапазоне от 365 до 2325,4 нм, и термооптические постоянные, позволяющие экстраполировать температурное изменение показателя преломления при температурах от минус 60 до плюс 120°C в спектральном диапазоне от 365 до 1060 нм [4].

С целью повышения конкурентоспособности отечественных марок бесцветного

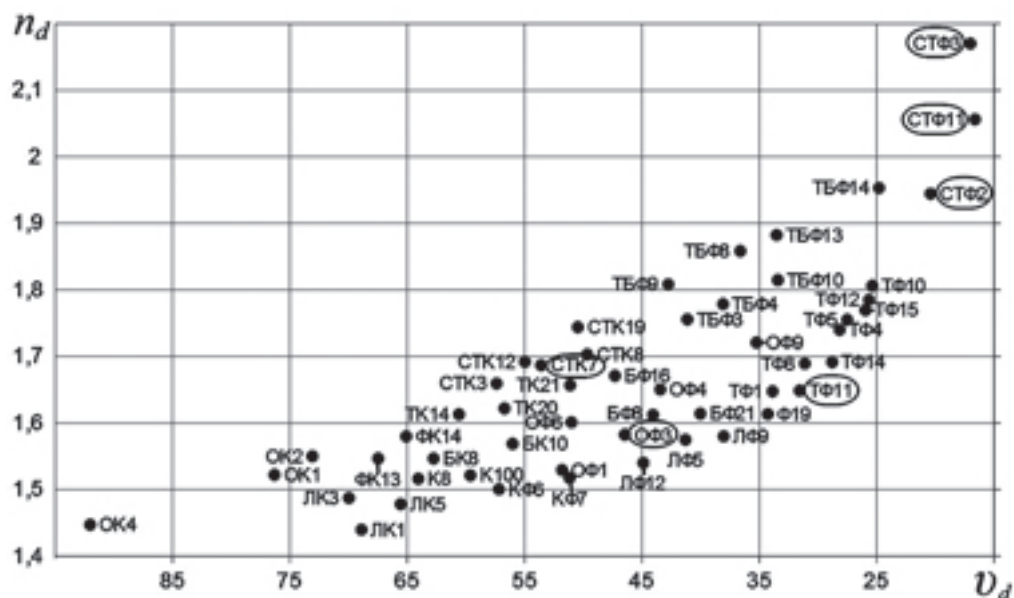


Рисунок 1.

Минимизированный каталог оптического стекла, достаточный для решения задач проектирования оптических систем

оптического стекла предложена эффективная методика расчёта оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол [3].

На основе указанной методики разработана программа по автоматической замене стёкол в оптических системах на марки из ограниченного перечня (ПАЭС).

Блок-схема программы представлена на рис. 2 [3].

Использование ПАЭС при проектировании оптических систем позволяет повысить качественные характеристики проектируемых оптических систем, увеличить производительность труда конструкторов путем автоматизации выбора марок стекол, входящих в оптические системы.

Работа программы основана на неравенстве [3]:

$$R_{\max} \leq 0,04, \quad (1)$$

где



Рисунок 2.

Блок-схема программы по автоматической замене стёкол в оптических системах (ПАЭС)

$$R_{\max} = \sqrt{(0,01 \cdot \Delta v_d)^2 + (\Delta n_d)^2 + (\Delta n_d)^2 + [10 \cdot (\Delta P'_{\lambda,F} - \Delta P''_{\lambda,F})]^2} \quad (2)$$

Указанная методика была опробована на АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) и показала положительный результат.

В частности, был модернизирован объектив [5], разработанный специалистами АО ЛЗОС, показанный на рис. 3

В представленном объективе была повышена технологичность сборки и юстировки отдельных компонентов и объектива в целом при сохранении технических характеристик, качества получаемого изображения, конструктивных параметров большинства оптических элементов.

Результатом использования ограниченной номенклатуры марок стёкол также стал объектив с фокусным расстоянием 8,45 мм, относительным отверстием 1:1,4 с углами поля зрения по горизонту 43,5° и вертикали 33° (рис. 4), обеспечивающий контраст

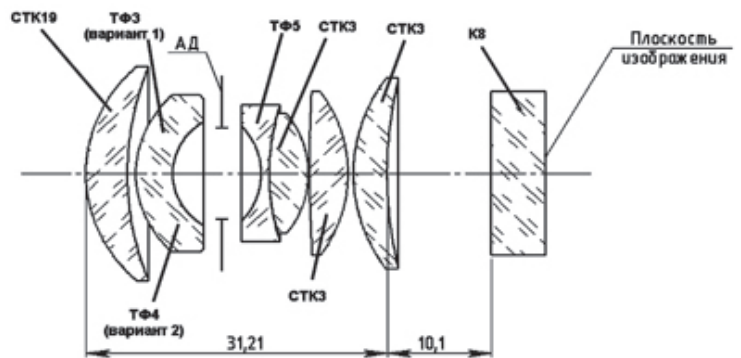


Рисунок 3.
Объектив с $f' = 20,4$ мм,
где АД – апертурная диафрагма

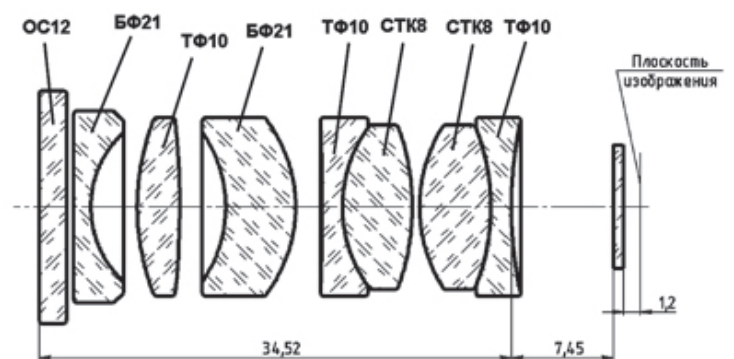


Рисунок 4.
Объектив с $f' = 8,45$ мм

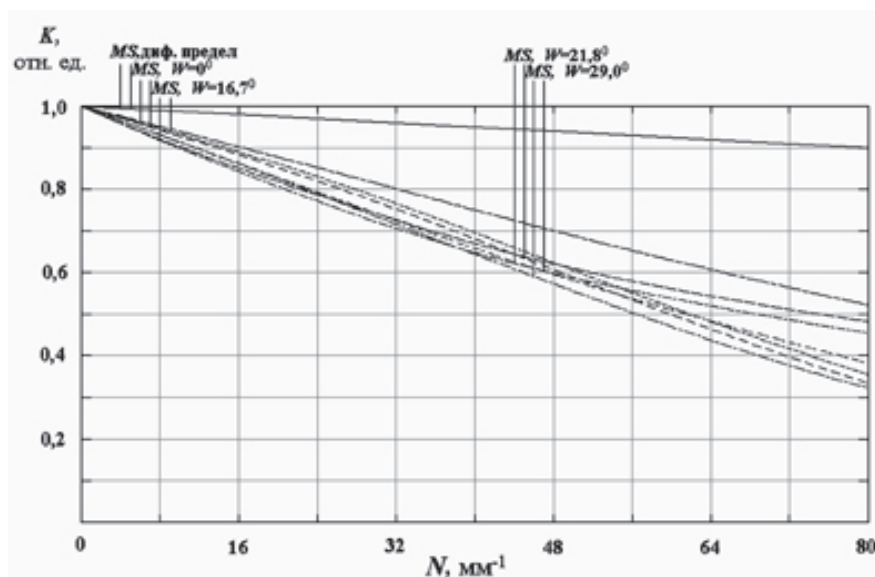


Рисунок 5.
Частотно-контрастная характеристика объектива с $f' = 8,45$ мм
в спектральном диапазоне длин волн от 0,535 до 1 мкм

0,63 для точки на оси на частоте 60 мм^{-1} в диапазоне от 0,535 до 1 мкм (рис. 5).

С целью расширения линейки телевизионных камер был разработан объектив с фокусным расстоянием 5,58 мм, относительным отверстием 1:1,4 с углами поля зрения по горизонту 68° и вертикали 49° (рис. 6), обеспечивающий контраст 0,64 для точки на оси на пространственной частоте 60 мм^{-1} в диапазоне от 0,4 до 1 мкм (рис. 7) [6].

Представленные объективы были изготовлены на АО «ЛЗОС» и прошли все необходимые испытания в составе оптико-электронных комплексов, где подтвердили свои расчётные качественные характеристики.

Список литературы:

1. ГОСТ 3514–94. Стекло оптическое бесцветное. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1994. – 35с.

2. Малькин А.А. Методы минимизации номенклатуры бесцветного оптического стекла/ СПб.: Сборник трудов VIII Международной конференции молодых учёных и специалистов «Оптика – 2013», НИУ ИТМО, 2013. – с. 354–357.

3. Малькин А.А. Алгоритмы расчёта оптических систем с использованием ограниченного перечня марок стёкол/ Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъёмка, вып.4, 2014. – с. 113–119.

4. Малькин А.А. Моделирование температурной зависимости показателей преломления отечественных марок стёкол в программе ZEMAX/ М.: Научно-технический журнал «Контенант», Том 14, №1, 2015. – с.3–7.

5. Пат. 2560748 Российская федерация, МПК7

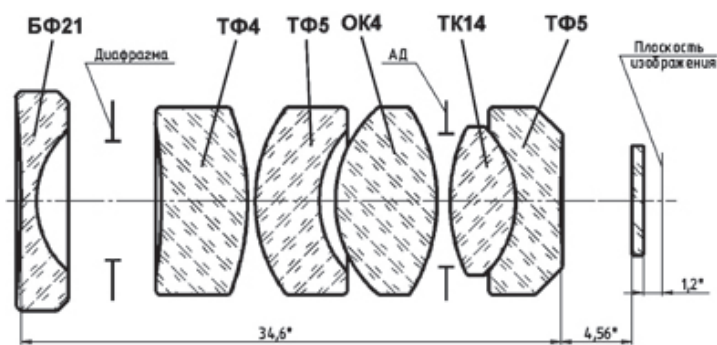


Рисунок 6.
Объектив с $f' = 5,58 \text{ мм}$

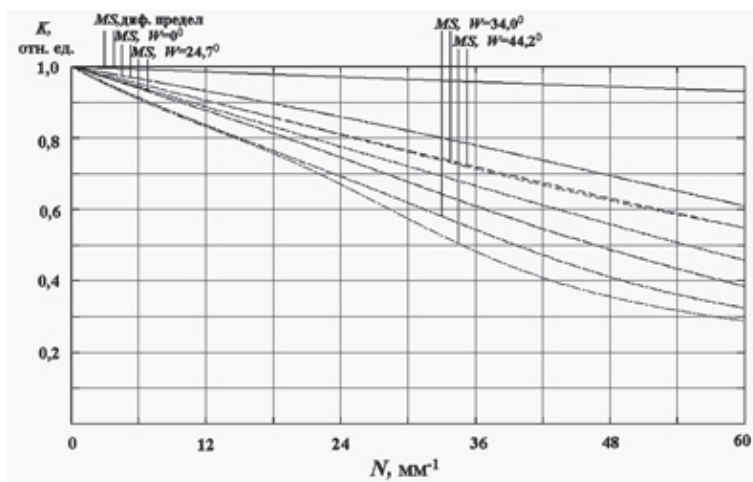


Рисунок 7
Частотно-контрастная характеристика объектива $f' = 5,58 \text{ мм}$ в спектральном диапазоне от 0,4 до 1 мкм

G02B 9/60, G02B 11/30. Светосильный объектив/ Малькин А.А., Грудзино Ю.Б.; заявитель и патентообладатель АО «Лыткаринский завод оптического стекла». – №2014123180/28; заявл. 09.06.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. №23. – 6с.: ил.

6. Пат. 2545465 Российская федерация, МПК7 G02B 9/60, G02B 11/30. Светосильный объектив/ Малькин А.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла». – №2013142872/28; заявл. 23.09.2013; опубл. 27.03.2015, Бюл. №9. – 6с.: ил.

СТРУКТУРА И КАЧЕСТВО ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

Часть I. Качество ППС и топологическая модель тернарного типа системы как структурного критерия качества

КУЗНЕЦОВ С.А. *, НЕМТИНОВ В.Б. **, СЕРИКОВ В.Ю.***

*НПО «Оптика»

**МГТУ им. Н.Э.Баумана

***АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Блог: <http://www.bmstu.ru/ps/~nemtinov>

E-mail: omp-21@lzos.ru, kuznecovsa@npooptica.ru

В рамках структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем (ОиЛзЭлнС), как модельно-графовой теории, представляющей собой объединение топологии графового языка и концептуального факторно-модельного средства, проанализирована возможность оценки качества процесса преобразования сигналов (ППС). В основе структурного подхода к оценке качества лежит топологическая модель тернарного типа системы, рассматриваемая как структурный критерий качества (СКК). Указано, что разработка структуры оптимальной системы возможна по отношению к определенным классам (типам) как оптических, так и электрических сигналов. Найдено, что базисные классы (типы) сигналов образуют простейшие инвариантные совокупности в виде подгрупп и подполугрупп, состоящие из типовых (специфических) сигналов, пространственно-временная симметрия которых согласована (совпадает) с симметрией оптико- и лазерно-электронных преобразующих элементов. В рамках классической и общей топологии введено понятие типа топологического пространства на основе графовых фигур. Показано, что идеальный ППС представляет собой топологическое гомеоморфное (взаимно однозначное и взаимно непрерывное) отображение, связывающее между собой согласованные сигнальные и преобразованные фигуры (подмножества сигналов). Найдено, что фактор-топологические структуры, состоящие из групповых классов эквивалентности сигналов и задающие отношение близости между точками (сигналами) и некоторыми подмножествами точек (фигурами), следует рассматривать как сигнальные типы. Построено множество основных элементов топологической модели поведенческого типа системы, содержащее унарные типы сигналов в виде элементов факторгрупп (сигнальных классов эквивалентности), а также системно-поведенческий операторный идентификатор. Идентифицирована топологическая модель тернарного поведенческого типа системы, задающая СКК ОиЛзЭлнС. Модель представлена в матрично-графовом виде, который отождествляет тернарный поведенческий тип системы.

Ключевые слова: структурная теория; структурный критерий качества; оптико- и лазерно-электронная система; тип сигнала; типовой сигнал; топология; фактор-топология; фактор-группа; топологическое пространство; симметрия; структурная, поведенческая и топологическая математическая модель; факторно-модельный синтез системы.

ВВЕДЕНИЕ

Графовая идентификация процесса преобразования сигналов (ППС) в оптико- и лазерно-электронных системах (ОиЛзЭлнС), как отображение множества сигналов в себя, складывается из графового описания преобразования унарных типов оптических сигналов и их представителей в виде типовых сигналов с целью последующей трансформации последних в одномерные электрические сигналы для дальнейшей обработки в электронном тракте [1, 2]. Математические модели (ММ) преобразующих элементов (ПЭ), полученные с помощью общих положений классической теории ОиЛзЭлнС в координатном или частотном пространствах, позволяют идентифицировать тип сигнала, как структурный критерий качества системы. В результате типы сигналов, как структурные элементы теории множеств, математически описывают поведение системы и её физической предметной модели (прибора) как бы «изнутри».

В рамках структурной теории (СТ) ОиЛзЭлнС, как модельно-графовой теории, представляющей собой объединение графового языка и концептуального факторного модельного средства [1-4], анализируют типовые параметры сигнала и статистические характеристики помехи на выходе любого ПЭ с помощью структурной, функциональной или принципиальной схемы системы. Далее с помощью принципа единства структурной и поведенческой связности предметных и теоретических моделей строят принципиально новые графовые модели и вводят новые понятия.

В результате ставится задача о конечной цели, которая должна быть достигнута на основе исходных данных с помощью разрабатываемых модельных представлений синтезируемой системы. *Во-первых*, какой должна быть структура (строение) ОиЛзЭлнС, чтобы решение поставленной задачи было наиболее качественным? *Во-вторых*, каковы потенциальные возможности систем различного назначения? *В-третьих*, как организуют-

ся оценки получаемых результатов в каждом конкретном случае? Другими словами, рассмотрим круг вопросов, относящихся к категории задач, решаемых в рамках анализа конкретной структурной, функциональной или принципиальной схемы системы, необходимо перейти к дальнейшему развитию основ структурной теории синтеза ОиЛзЭлнС на основе построения типовых сигналов. Для этого необходимо создать топологическое единство сигнального мира, в котором правит симметрия в виде частных случаев структурной и поведенческой связности. Отправные положения теории заложены в работах [1-3].

С этой целью идентифицируются три варианта общей постановки задачи [4]. Во-первых, рассматривается задача обнаружения объекта, эквивалентная задаче обнаружения полезного сигнала на фоне помех. Во-вторых, возникает задача измерения неизвестных параметров сигналов на фоне помех, т.е. речь идёт о разработке и апробации измерительных оптико- и лазерно-электронных приборов (ОиЛзЭлнП). В-третьих, формируется задача, которая сводится к восстановлению и воспроизведению полезного сигнала в «чистом» виде, когда источником помехи являются только внутриприборные шумы.

Для достижения качественных результатов решение трёх рассмотренных задач сопровождается обработкой поступающего на вход системы оптического сигнала с учётом его типовых свойств. Обработка, как правило, связана с определенным улучшением соотношения между полезным сигналом и помехой и поэтому во всех случаях носит название фильтрации полезного сигнала. В этом проявляется общность функционирования систем различного назначения. Однако различие конечных целей вносит существенные особенности в структуру используемых фильтров, и вызывает необходимость применения разных критериев оценки получаемых результатов, что приводит к идентификации метода типовых сигналов.

ТИПЫ СИГНАЛОВ И КАЧЕСТВО ППС В ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО- ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

По мере создания новых ОиЛзЭлнС становится ясным, что разработка оптимальной системы возможна по отношению к определенным классам (типам) как оптических, так и электрических сигналов. При этом для углубленного понимания информации, извлекаемой в процессе работы системы, особое значение приобретает анализ структурной связности отдельных этапов ППС. Ставить и решать задачи именно такого класса позволяет СТ ОиЛзЭлнС, которая идентифицирует единство факторно-графовых модельных представлений ППС и задаёт маршруты (пути) разработки (проектирования и изготовления), апробации и последующей прогностической ликвидации ОиЛзЭлнС в процессе их создания и использования в рамках факторно-модельного синтеза системы [1-6]. Хотя первоначально структурная теория создавалась В.Б.Немтиновым для оптико-голографических [7-9] и фурье-преобразующих [10] систем, но впоследствии оказалось, что основные положения структурно-модельного подхода к оценке качества ППС в ОиЛзЭлнС применимы к сигналам любой физической природы.

Качество ППС в ОиЛзЭлнС неразрывно связано с её структурой. Но как выявить эту связь? Как описать те элементарные классы (типы) входных сигналов, из которых в результате вариации оператора поведения $\mathcal{P}_{\text{пвд}}$ получится высококачественный преобразованный сигнал? Частично ответ на этот вопрос даёт идентификация и анализ сигнальных \mathcal{S} и преобразованных $\underline{\Sigma}$ функциональных параметрических пространств, рассматриваемых, прежде всего, как *метрические* пространства непрерывных функций.

В рамках анализа ППС в ОиЛзЭлнС пространство представляет собой бесконечномерное параметрическое множество. Оно имеет структуру, определяемую аксиоматикой свойств его элементов, например, точек в геометрии или бесконечномерных параметрических функций изучаемых в функциональном анализе.

Так как всякое метрическое пространство является *топологическим* пространством, то введение топологии [11,12] с помощью метрики позволит в дальнейшем формализовать связность качества ППС и структуры оптико- и лазерно-электронной системы. Задавая групповую структуру топологических пространств в виде симметризованных аддитивных групп и полугрупп входных сигналов s и преобразованных сигналов σ , строят факторизованную групповую структурную модель ППС, как частный случай графовой математической модели [2, 3].

В настоящее время теория групп превратилась в обширную ветвь математики, занимающую совместно с теорией графов одно из первых мест в современной дискретной математике (прежде всего в алгебре). Основные понятия теории групп, как одного из важных разделов «неколичественной» математики, входят в большой круг физико-математических исследований [3-12]. С помощью теории групп и её важнейшего для приложений раздела – теории представлений – можно получить самые неожиданные, не связанные друг с другом результаты. Так можно показать, что существует всего 230 типов кристаллических решеток, что уравнение пятой степени неразрешимо алгебраическими методами, а также получить важные сведения о системе уровней энергии в квантовой технике или структуре молекул в химии. При этом теория групп оказывается весьма полезной при систематизации широкого круга физических задач, связанных с теми или иными проявлениями симметрии при описании структуры ППС.

Полное изложение теории групп можно найти в ряде специальных монографий. Однако основные положения теории групп, используемые при оценке качества ППС в ОиЛзЭлнС, достаточно хорошо изложены в [5]. Группа представляет собой множество элементов с ассоциативной бинарной алгебраической операцией, определённой на этом множестве. В ней существует нейтральный

(единичный) элемент, а для любого элемента существует обратный элемент. Если ограничиться заданием на этом множестве только ассоциативной бинарной операции, то группа трансформируется в полугруппу. Полугруппа с нейтральным элементом называется моноидом. Группа обладает только одной операцией. Эта особенность существенно отличает её от других множеств, с которыми приходится встречаться инженеру.

В [3, 5] показано, что качество ППС в реальной ОиЛзЭлнС тесно связано с групповыми дифракционными и интерференционными свойствами пространств когерентных входных S и выходных преобразованных σ сигналов. В результате пространства идентифицируют в виде симметризованных аддитивных сигнальной группы $\mathbb{G}\mathbb{S}$ и преобразованной группы $\mathbb{G}\Sigma$ соответственно. В случае некогерентных входных и преобразованных сигналов пространства рассматриваются как соответствующие аддитивные полугруппы $\text{Semi}\mathbb{G}\mathbb{S}$ и $\text{Semi}\mathbb{G}\Sigma$ с нейтральным элементом, равным тождественно нулю. Базисными классами (типами) сигналов оказываются в определенном смысле простейшие инвариантные подгруппы $\mathbb{H} \subset \mathbb{G}\mathbb{S}$ и $\mathbb{T} \subset \mathbb{G}\Sigma$ (подполугруппы $\text{Semi}\mathbb{H}$ и $\text{Semi}\mathbb{T}$), состоящие из типовых (специфических) сигналов, пространственно-временная симметрия которых согласована (совпадает) с симметрией оптико- и лазерно-электронных преобразующих элементов (ПЭ).

Произвольные типы сигналов являются элементами (классами эквивалентности) аддитивных сигнальной $\mathbb{G}\mathbb{S} / \mathbb{H} = \{S_r^H\}$ и преобразованной $\mathbb{G}\Sigma / \mathbb{T} = \{\Sigma_p^T\}$ факторгрупп по этим подгруппам [5]. Тогда задача оценки качества на основе построения типов сигналов сводится к отысканию простейших аддитивных подгрупп в сигнальной $\mathbb{G}\mathbb{S}$ и преобразованной $\mathbb{G}\Sigma$ группах (полугруппах) с последующей их факторизацией с целью разложения на соответствующие классы эквивалентности $S_r^H = \{s\}$ и $\Sigma_p^T = \{\sigma\}$.

Так как преобразованный сигнал σ на выходе ОиЛзЭлнС используется для выполне-

ния различных задач, то очевидно, что качество ППС во многом субъективно и изменяется в зависимости от назначения системы. Понятие качества ППС в ОиЛзЭлнС связано с требованиями, предъявляемыми как к преобразованным σ , так и к входным S сигналам с учётом свойств связности оператора поведения $\mathcal{P}_{\text{пвд}}$. Возможны, по крайней мере, два подхода к оценке качества ППС ОиЛзЭлнС, в которые вкладывают два на первый взгляд разных смысла [4-10, 13-15].

С одной стороны, в визуальных ОиЛзЭлнС, где информация предъявляется дисайдеру (человеку-оператору), высококачественное изображение (поле визуализированных параметров σ) должно быть наиболее близко к исходному сигнальному параметрическому полю s . Иначе говоря, речь идет об оценке степени сходства входного S и преобразованного σ параметрических полей, а качество ППС оценивается ковариационной или корреляционной степенью этого сходства. *С другой стороны*, когда преобразованный сигнал мало похож на объект, наилучшему качеству ППС в системе соответствует максимальное количество информации, которое можно получить из преобразованного сигнала при заданном отношении сигнал/помеха или сигнал/шум (информационный критерий качества [16]).

В то же время только в рамках СТ ОиЛзЭлнС, открывающей принципиально новые графовые инженерно-технические законы факторно-модельной структурной связности [4-10], становится ясно, что эти два на первый взгляд разных подхода к анализу качества ППС фактически определяют два количественных свойства конкретного типового сигнала $\{mc\}$, который служит представителем создаваемого тернарного типа сигналов ($\text{TC} = \langle\langle\{mc\}\rangle\rangle$), выступающего в виде сигнального идентификатора структурного критерия качества системы. При этом каждый количественный критерий оценивает определенное свойство ППС и связан с унарными типами тернарного поведенческого типа ОиЛзЭлнС.

СИММЕТРИИ СТРУКТУРНЫХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ММ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТИПОВ СИГНАЛОВ

Как сказано ранее, наведением порядка в мире сигналов управляет симметрия в виде частных случаев структурной и поведенческой связности. Понятие симметрии прочно вошло в современные физические теории [3-5]. Термин «симметричный» по-гречески означает «соразмерный, пропорциональный, одинаковый в расположении частей».

На практике термин «симметрия» употребляется в двух значениях. *Во-первых*, в обычном понимании симметричное означает нечто, обладающее хорошим соотношением пропорций, уравновешенное. А симметрия обозначает вид согласованности отдельных частей, объединяющий их в единое целое.

Фундаментальными оптическими примерами *второго, научного значения* термина «симметрия» являются осевая симметрия сферических линз и зеркальная симметрия объектов, симметрия левого и правого. Эти оптические симметрии – строго геометрические понятия. Почему один технический объект (линза, транспарант) более симметричен, чем другой? Точный ответ на этот вопрос даёт анализ множества всех движений, которые совмещают исходный объект с ним самим. Оказывается, что это множество движений образует некоторую группу преобразований технического объекта (группу симметрии).

В свою очередь, в [3] указано, что в рамках научного подхода к описанию симметрии в термин группа симметрии вкладывают два различных смысла. В первом случае визуально наблюдаемая геометрическая симметрия базируется на инвариантности (неизменности вида) некоторой конфигурации технических объектов (прежде всего ПЭ «б») относительно определённой группы преобразований – группы автоморфизмов (например $Gr\mathcal{P}_b^{сим}$). Во втором случае физической симметрии параметрических полей группы симметрии ППС в ОиЛзЭлнС есть группы преобразований $Gr\mathcal{P}_s^{сим}$ и $Gr\mathcal{P}_\Sigma^{сим}$, неиз-

меняющие физическую структуру входного S или преобразованного Σ сигнальных параметрических подпространств.

Поэтому когда говорят о симметрии физико-технического объекта (сигнала, ПЭ, уравнения и т. п.), то описывают совокупность (группу) инвариантных преобразований (отображений) $\mathcal{P}_{инв} = \mathcal{P}_{пвд}^{сим}$, которые оставляют данный объект неизменным, т.е. в результате инвариантного преобразования объекта снова получают исходный объект. Симметрия характеризует общность объектов, асимметрия – их индивидуальность. Именно симметрия ограничивает число возможных вариантов объектов, а также число возможных вариантов поведения различных систем, т.е. типов сигналов. Это число вариантов имеет большое значение в программировании.

Одним из наиболее важных свойств, играющих ведущую, хотя и не всегда осознаваемую роль в моделировании системы, является внешняя и внутренняя симметрия не только ОиЛзЭлнС и её элементов, но и всего ППС в целом. В зависимости от характера отображаемых свойств симметрии связности общая задача системного исследования при описании ППС распадается на задачу структурного моделирования системных свойств и общую задачу функционирования (поведения) ОиЛзЭлнС и связанные с последней локальные задачи поведения ПЭ. Первая задача решается путём построения структурной ММ, называемой в дальнейшем структурной моделью (СМ). Для решения второй задачи используют различные ММ поведения, или для краткости модели поведения (МП). СМ и МП являются двумя кардинальными подклассами МSt Бурбаки-Колмогорова [2-4], которые в определённом смысле дополняют друг друга. Выделение этих моделей при описании ОиЛзЭлнС показывает, что её свойства в целом определяются как связями, так и поведением системы. При этом полная структурно-поведенческая (СтрПвднч) ММ ОиЛзЭлнС, объединяющая в себе СМ и МП и задающая описание ОиЛзЭлнС как связанной системы сигналов и элементов, имеет вид [3, 4]

$$\begin{aligned} \text{СтрПвднчММ}_{\text{ОиЛзЭлнС}}^{\text{полн}} &\stackrel{\Delta}{=} \text{MSt}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \\ &= \langle\langle S, \Sigma, \mathbb{R}^5(x, y, z, \lambda, t), \mathbb{B}, \mathbb{Q}, \mathbb{G}, \mathbb{U}; R_1, \dots, R_l; \mathcal{P}_1, \dots, \mathcal{P}_n \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

Множества входных S и выходных Σ сигналов считаются заданными в соответствующих областях определения D_S и D_Σ пятимерного векторного пространства \mathbb{R}^5 , которые выделяются с помощью отношений R_D , входящих в общий набор отношений. На практике выделение областей осуществляется в рамках ММ конкретной ОиЛзЭлнС. Поэтому принято считать, что задание множеств S и Σ предполагает построение областей D_S и D_Σ .

Таким образом, в результате решения проблем описания и идентификации системы строится полная СтрПвднчММ ОиЛзЭлнС (1), в которой заданы преобразующие элементы $\mathbb{B} = \{b_{\text{ПЭ}}\}$, внешние \mathbb{Q} и внутренние \mathbb{G} параметры. Дополнительно с необходимостью используются фазовые переменные \mathbb{U} , характеризующие состояния всех ПЭ, и идентифицированы все отношения R_l и операторы \mathcal{P}_n .

По способу описания свойств симметрии связности задача системного исследования при анализе ППС складывается из внешнего и внутреннего описания. Это отражается в построении внешней (Внш) и внутренней (Внтр) ММ, как частных случаев MSt Бурбаки-Колмогорова.

Внешняя (Внш) ММ предназначена для отображения внешней связности «вход-выход» и не содержит деталей ОиЛзЭлнС. Она строится в результате описания множеств входных S и выходных Σ сигналов, а также множества \mathbb{Q} внешних параметров. Особенностью ВншММ служит унарный характер отношения R_b^1 на множестве $\mathbb{B} = \{b_{\text{ПЭ}}\}$, состоящем из одного ПЭ, звена или собственно ОиЛзЭлнС. Единственным источником информации о поведении системы является наличие недетализированного формально заданного отображения \mathcal{P}_b , описывающего поведение ПЭ и связывающего входы системы с её выходами. При этом о явном

виде преобразующего оператора \mathcal{P}_b ничего сказать нельзя, так как внутренний механизм преобразования входных сигналов в выходные сигналы либо не принимается во внимание из-за его сложности, либо о нем вообще ничего не известно. В результате ВншММ задает макроописание любого объекта ОиЛзЭлнС, выделяемого как укрупненная подсистема (её иногда называют макромоделью):

$$\text{ВншММ} = \langle\langle S, \Sigma, \mathbb{Q}; b_{\text{ПЭ}}; R_b^1, \mathcal{P}_b \rangle\rangle. \quad (2)$$

Иначе говоря, ВншММ – это основная ММ, построенная на принципе формально заданного «черного ящика», под которым понимают любую систему, если её внутреннее устройство не рассматривают, а исследуют только выходные реакции на входные воздействия. ВншММ строится, когда о внутренней структуре моделируемого технического объекта (ПЭ, звена, ОиЛзЭлнС) известно очень мало. Основные множества $S, \Sigma, \mathbb{Q}, \mathbb{B} = \{b_{\text{ПЭ}}\}$ задают внешнее элементное описание системы. Унарное отношение R_b^1 формализует внешнюю структурную связность «быть моделируемым объектом». Наконец, оператор \mathcal{P}_b говорит о наличии внешней поведенческой (функционально-преобразующей) связности и идентифицирует формальное описание ППС в ОиЛзЭлнС. При этом от ВншММ требуется только адекватность внешнего поведения: на одинаковые входные сигналы моделируемая система и её ВншММ должны откликаться одинаково.

Внутренняя (Внтр) ММ служит для описания внутренней связности сигналов и элементов при анализе ППС в ОиЛзЭлнС путем детализации отображения \mathcal{P}_b в виде набора формально заданных операторов \mathcal{P}_{b_j} ($j = \overline{1, n}$). Соответствующая MSt содержит множества $S_1, \dots, S_j, \dots, S_n$ сигналов на входе всех преобразующих элементов $b_j^{\text{ПЭ}}$, поведение которых идентифицируется операторами

\mathcal{P}_{bj} , а также включает в себя множества выходных сигналов Σ и внутренних параметров G . На основе множеств, задающих внутреннее поэлементное описание системы, MSt трактуют, как расширение (2), и иногда называют поэлементной моделью, так что

$$\begin{aligned} \text{ВнтрММ} = \langle\langle S_j, \Sigma, \mathbb{B} = \mathbb{B} = \{b_j^{пэ}\}, \\ G; R_{\mathbb{B}}^m; \mathcal{P}_{bj} \rangle\rangle, \quad j = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (3)$$

В силу относительной простоты и ограниченного объема информации о моделируемом объекте, заключенного во Внш и ВнтрММ, на практике их обычно используют на ранних этапах исследования мало изученных систем. В структурной теории ОиЛзЭлнС эти ММ самостоятельно почти не рассматриваются, а выступают как разновидности структурной ММ и ММ поведения [3, 4].

Структурная модель (СМ) ОиЛзЭлнС служит для описания структурной связности между элементами системы, т. е. для формализации реальных элементов (звеньев) и связей между ними. Она определяет симметрию структурной связности преобразующих элементов с учетом влияния всех параметров, как направление передачи типовых сигналов определенной физической природы. В результате структурного описания системы с помощью основных множеств $S, \Sigma, \mathbb{B} = \{b_{пэ}\}, Q, G$ и явного задания отношений (связей) $R_{\mathbb{B}}, R_S, R_{\Sigma}, R_Q, R_G$ между элементами этих множеств соответствующая MSt имеет вид

$$\begin{aligned} \text{СМ}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle\langle S, \Sigma, \mathbb{B}, Q, G; \\ R_{\mathbb{B}}, R_S, R_{\Sigma}, R_Q, R_G; \mathcal{P}_b \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

ВншСМ, или унарная СМ, характеризует внешние свойства структурной связности недетализированного формально заданного отображения \mathcal{P}_b с помощью элемента $b_{пэ}$ и, прежде всего, внешнюю топологию и симметрию пространственно-временных сигналов пространств S и Σ , так что

$$\begin{aligned} \text{ВншСМ}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle\langle S, \Sigma, Q; b_{пэ}; \\ R_b^1, R_S, R_{\Sigma}, R_Q \mathcal{P}_b \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Отношения R_S и R_{Σ} выделяют основные типы (классы) входных s и выходных σ сиг-

налов, а R_Q описывает связи на множестве Q внешних параметров. Если моделируемый объект $b_{пэ}$ совпадает со всей ОиЛзЭлнС, то последняя рассматривается как «черный ящик», преобразующий входные типовые сигналы связности R_S в выходные типовые сигналы связности R_{Σ} в соответствии с формальным функциональным правилом $\mathcal{P}_{\text{ОиЛзЭлнС}}$.

ВнтрСМ идентифицирует внутреннее описание свойств структурной связности детализированного формально заданного отображения, а именно внутреннюю симметрию и внутренние топологические свойства типовых сигналов, и тем самым позволяет получать сведения о поведении поэлементных операторов \mathcal{P}_{bj} , явный вид которых неизвестен. При этом одновременно детализируются связи R_{sj} между типовыми сигналами на входе всех ПЭ и выходе R_{Σ} системы, а также связи R_G на множестве внутренних параметров, так что

$$\begin{aligned} \text{ВнтрСМ}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle\langle S_j, \Sigma, \mathbb{B}, \mathbb{B} = \{b_j^{пэ}\} \\ G; R_{\mathbb{B}}^m, R_{sj}, R_{\Sigma}, R_G; \mathcal{P}_{bj} \rangle\rangle, \end{aligned} \quad (6)$$

где $j = \overline{1, n}$.

На современном уровне классической теории ОиЛзЭлнС при анализе ППС на практике детализация оператора $\mathcal{P}_{\text{ОиЛзЭлнС}}$ обычно сводится к заданию композиции преобразующих поэлементных операторов, т. е. к последовательному осуществлению нескольких отображений, так что

$$\mathcal{P}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \mathcal{P}_{b_n} \dots \mathcal{P}_{b_j} \dots \mathcal{P}_{b_1}. \quad (7)$$

В рамках СМ симметрия связности типовых сигналов обычно имеет графовый, топологический или геометрический характер и её описание сводится к перечислению преобразований $\mathcal{P}_{пвд}^{\text{СМ}}$, оставляющих неизменными звено, ПЭ или их взаимное расположение в ОиЛзЭлнС, а также пространственно-временную структуру сигналов. Поэтому на практике Внш и ВнтрСМ часто интерпретируются в виде графовых, топологических и геометрических СМ, которые играют особую роль в задачах разработки и апробации ОиЛзЭлнП на основе созданной ММ ОиЛзЭлнС.

Геометрическая модель (ГмтМ) воспроизводит геометрические свойства структурной связности типа сигналов и моделируемого объекта и используется на низших иерархических уровнях проектирования [4]. ГмтМ обычно имеет вид чертежей и графиков, необходимых при решении задач конструирования. При этом внутренняя симметрия ОиЛзЭлнС может проявляться как внешняя симметрия отдельного звена или ПЭ. Эти модели подразделяются на двумерные и трёхмерные. Среди трёхмерных моделей выделяются каркасные и поверхностные ГмтМ, а также модели сплошных тел (сплошные ГмтМ).

В работах [1-4] показано, что в настоящее время особую роль начинает играть графовая модель, так как она обладает ярко выраженным прикладным характером. Частным случаем ГрфМ является топологическая модель (ТплгМ), которая имеет вид

$$\text{ТплгМ} = \text{MSt}_{\text{тплг}} = \langle\langle \mathbb{B} = \{b_{\text{тп}}\}; R_{\text{в}} \rangle\rangle. \quad (8)$$

Её отличием от ГрфМ является анализ связности только ПЭ.

Главной задачей ТплгМ является выделение и изучение свойств топологических пространств и топологических инвариантов [11, 12]. К числу важнейших топологических инвариантов относятся, прежде всего, связность, размерность, вес и фундаментальная группа, которые отображают состав и симметрию взаимосвязей ПЭ и типов сигналов. Эту модель часто применяют на высших иерархических уровнях автоматизированного проектирования для описания ОиЛзЭлнП, состоящих из большого числа звеньев, для решения задач привязки конструктивных элементов к определенным пространственным позициям в рамках сетевой топологии. В структурной теории ТплгМ модели задают схему расположения и соединения сетевых оптико-электронных устройств, расположенных в каком-либо пространстве и имеют вид формализованных схем, матриц, графов и т. п.

Модель поведения (МП) ОиЛзЭлнС отображает наличие поведенческой связности и симметрию поведения как характер передачи

типовых сигналов с возможной трансформацией их физической природы путем явного описания физических процессов, лежащих в основе функционирования ПЭ, звена или всей ОиЛзЭлнС в целом [3, 4], так что MSt имеет вид

$$\text{МП}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle\langle S, \Sigma, \mathbb{B}, Q, G, U; R_{\text{в}}; R_{\text{с}}, R_{\Sigma}, R_{\text{Q}}, R_{\text{G}}, R_{\text{U}}; \mathcal{P}_{\text{в}}(s | Q, G, U) \rangle\rangle. \quad (9)$$

МП подчеркивает индивидуальные специфические особенности поведения моделируемого объекта, которые наиболее полно проявляются в определенных, заранее известных условиях, и прежде всего симметрию поведения. При этом описание симметрии поведения сводится к перечислению группы инвариантных преобразований, которые не выводят выходной сигнал $\sigma = \mathcal{P}_{\text{в}}(s | Q, G, U)$ из заданного подмножества $\Sigma_0 = \{\sigma\} \subset \Sigma$ выходных сигналов с определенными свойствами. Иногда МП ОиЛзЭлнС называют функциональной моделью.

ВншМП описывает внешние свойства поведенческой связности, как например, линейность, внешнюю симметрию поведения и т.п. с помощью явно заданного оператора поведения без выделения фазовых переменных U , совпадающих с выходными сигналами, так что

$$\begin{aligned} \text{ВншМП}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \\ = \langle\langle S, \Sigma = U, Q, G, b_{\text{ПЭ}}; R_{\text{в}}^1; R_{\text{с}}, R_{\Sigma}, \\ R_{\text{Q}}, R_{\text{G}}; \mathcal{P}_{\text{в}}(s | Q, G) \rangle\rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

ВншМП в явном виде показывает, как осуществляется преобразование сообщения в сигнал или преобразование одного типового сигнала в другой. При описании ППС в ОиЛзЭлнС внешняя симметрия поведения проявляется, как симметрия сдвига входных и выходных сигналов в пространстве и во времени, что обуславливает выделение фундаментальных подклассов инвариантных в пространстве (изопланарных) и во времени (стационарных) систем.

В частности, явно заданный инвариантный оператор поведения оптической изображающей системы в координатном пространстве имеет вид свертки $Sv(s | Q, G)$ и задаёт свёр-

точную модель поведения (SvM). В частотном пространстве выделяют «эф»-модель поведения (\mathcal{F} -МП) оптической фурье-преобразующей системы [3, 4].

Для описания симметрии комплексных произвольных регулярных и случайных оптических параметрических полей, а также случайных процессов используют функции взаимной ковариации $Kv(s|Q, G)$ и корреляции $Kr(s|Q, G)$, характеризующие их сходство при относительном сдвиге. В этом случае говорят о ковариационной модели поведения (KvM) и корреляционной модели поведения (KгM) системы, которые характеризуют степень схождения типовых сигналов при сдвиге, как степень их ковариации и корреляции [4]. В рамках KvM оценивается степень когерентности оптических полей и вычисляется оптическая передаточная функция некогерентной оптической изображающей системы.

К другим видам внешней симметрии, присущей только оптическим ПЭ, относятся такие разновидности геометрической симметрии, как осевая симметрия сферических линз и плоскостная симметрия цилиндрических линз, призм, пластин. Это в свою очередь обуславливает центральную и зеркальную симметрию геометрооптического изображения [4]. Для задания их поведения на практике широко используют транспарантное приближение. В этом случае функционирование реального ПЭ можно приближенно описать, рассматривая его как транспарант, используемый для модуляции падающего на него оптического излучения. При этом под транспарантом (Тр) понимают физическое тело, влиянием толщины которого можно пренебречь. В транспарантном приближении мультипликативная пропускающе-отражательная транспарантная МП, или $\tau\rho$ -ТрМ, описывает поведение ПЭ как результат умножения входного типового сигнала на коэффициент пропускания $\tau^{TP}(x, y|Q, G)$ или отражения $\rho^{TP}(x, y|Q, G)$, которые задают геометрическую симметрию ПЭ.

ВнтрМП отображает внутренние свойства поведенческой связности типовых сигналов,

как например, линейность и внутреннюю симметрию поведения преобразующих операторов \mathcal{P}_b , имеющих вид соответствующих уравнений. Она описывает, прежде всего, множество \mathcal{U} фазовых переменных, совокупность m -арных отношений R_B^m ($m \geq 1$) на множестве ПЭ $B = \{b_j^{TP}\}$ и набор явно заданных преобразующих поэлементных операторов $\mathcal{P}_b(s|Q, G, \mathcal{U})$, так что

$$\text{ВнтрМП}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle\langle S_j, \Sigma, B = \{b_j^{TP}\}, Q, G, \mathcal{U}; R_B^m; R_{S_j}, R_\Sigma, R_Q, R_G, R_U; \mathcal{P}_{b_j}(s|Q, G, \mathcal{U}) \rangle\rangle, \quad j = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Её основное отличие от ВншМП состоит в построении внутреннего фазово полного описания основных множеств и внутренней фазово завершённой детализации структурной связности в результате введения фазовых переменных \mathcal{U} , характеризующих состояние всех ПЭ. Кроме того, явный вид внутренних отображений \mathcal{P}_{b_j} обусловлен конкретным заданием поэлементных операторов в виде дифференциальных $\mathcal{P}_{\text{диф}}$, интегральных $\mathcal{P}_{\text{инт}}$, алгебраических $\mathcal{P}_{\text{алг}}$ или алгебрологических $\mathcal{P}_{\text{лгч}}$ уравнений, связывающих между собой основные множества. Из сравнения (10) и (11) следует, что ВнтрМП расширяет ВншМП, задаёт детальное описание ППС в конкретной ОиЛзЭлнС и либо строится в результате углублённого исследования (синтеза) новой системы, либо используется для анализа хорошо изученных систем. При этом внутренняя симметрия поведения характеризуется перечислением всех тех операторов, в результате которых преобразованное решение снова принадлежит множеству решений.

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИКО- И ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЕ

Разработка физических основ научного знания в современном смысле слова начинается с Галилея, который постулировал, что математика – это именно тот «язык на котором написана книга природы». Она представляет собой систему знаний, приводящую разработчика от абстрактных идей к конкретным

технологическим решениям. В глубинах математики всегда можно найти ключи к решению самых сложных задач. В частности, в работе предлагается топологический подход к анализу связности этапов ППС.

Это в частности относится к физико-техническим основам структурной теории ОиЛзЭлнС. В качестве конкретного примера, реализующего эту фундаментальную идею, в работе [2] идентифицирована научная проектно-техническая инженерия, которая в рамках СТ ОиЛзЭлнС задаёт принципиально новый математический структурно-графовый модельный язык для эффективной разработки и апробации ОиЛзЭлнП. В [2] впервые введены прямые и обратные структурно-графовые связи между наукой и техникой с целью перехода от фундаментальных научных исследований к прикладной технической науке. Графовые маршрутизаторы прямых и обратных связей, как между этапами модельного синтеза системы, так и между параметрами оптического пучка, идентифицированы в [6].

В инженерно-практическом плане построенные в [2] структурно-графовые связи направлены на использование в оптико-электронном приборостроении графовой методологии факторно-модельного синтеза системы [2-4] по аналогии с графовой методологией в радиоэлектронике. В [5-8] показано, что применение графовой методологии на основе структурной теории хорошо коррелирует с аналогичными методами, используемыми в радиоэлектронике и вычислительной технике.

В настоящее время в математической теории графов начинает широко использоваться понятийный аппарат классической и общей топологии, которые занимаются исследованием свойств фигур в общем случае. При этом под фигурой в топологии понимается любое множество точек в самом широком смысле слова. В [1-4] составляют детально исследованные в структурной теории ОиЛзЭлнС частности, фундамент графовой методологии факторно-модельного синтеза системы фигуры, состоящие из конечного числа вершин и дуг (рёбер), которые в клас-

сической топологии называются конечными графами. Они преобразуются друг в друга на основе топологических принципов гомеоморфной связности [11, 12].

В то же время вопросы, аналогичные разработке топологии интегральных микросхем и печатных плат в радиоэлектронике и вычислительной технике, созданию моделей вычислительных систем на базе сетей Петри и построению топологических сетей в промышленности [17], в оптическом приборостроении практически не рассматриваются. В то же время на практике сетевые модели (графики) используются достаточно широко. Например, они применялись при сооружении Челябинского блюминг-автомата, а также в США при создании баллистических ракет «Поларис».

Однако отставание в применении топологических сетей в оптическом приборостроении продолжает сохраняться, хотя в СТ ОиЛзЭлнС первые топологические шаги уже сделаны [2-5]. В настоящее время в рамках структурной теории сформулирована и решается математическая задача формирования сетевой топологии в оптическом приборостроении, как способа описания графовой конфигурации оптико-электронной сети. При этом сеть рассматривается в виде системы линий (графовых рёбер), которые задают схему расположения и соединения сетевых оптико-электронных устройств (вершин).

Сетевая топология может быть физической, описывающей реальное расположение и связи между узлами сети (конструкция); логической, которая описывает прохождение сигнала в рамках физической топологии (схемы); информационной, определяющей направление потоков информации, передаваемых по сети (кольцевая топология компьютеров). Учитывая возрастающую роль топологии на современном уровне знания, необходимо научиться решать задачи построения топологических чертежей и конструкций для разработки и апробации ОиЛзЭлнП, как это делается, например, в экологической топологии в архитектуре [11, 12, 17].

В СТ ОиЛзЭлнС сетевая топология в оп-

тическом приборостроении строится аналогично топологии интегральной микросхемы. Последняя представляет собой зафиксированное на материальном носителе пространственно-геометрическое расположение совокупности элементов интегральной микросхемы и связей между ними [18]. При этом в соответствии с Гражданским кодексом интегральная микросхема – это микроэлектронное изделие окончательной или промежуточной формы, предназначенное для выполнения функции электронной схемы. Элементы и связи изделия нераздельно сформированы в объеме и (или) на поверхности материала, на основе которого оно получено.

В этом смысле любой изготовленный объект следует рассматривать в виде топологии функциональной оптической схемы, как упрощенный оптический аналог топологии интегральной микросхемы. Этот аналог представляет собой материальное изделие (конструкцию, техническое решение), предназначенное для выполнения функции оптической схемы и фиксирующее пространственно-геометрическое расположение совокупности элементов объектива и связей между ними.

Существуют две трактовки термина «топология» [11, 12]. Одна из них идентифицирует целую науку – классическую топологию, предметом которой, как раздела математики, является исследование свойств фигур и их взаимного расположения, которые сохраняются при гомеоморфизмах, т.е. взаимно однозначных и взаимно непрерывных отображениях (деформациях). В частности, такими фигурами являются конечные графы. Иначе говоря, классическую топологию, имеющую своей целью выяснение и исследование идеи непрерывности, можно классифицировать как общую геометрию. Важной чертой этой геометрии является необычайная широта класса геометрических объектов, попадающих в сферу действия её законов, что приводит к существованию большой разнородности типов топологических пространств, например на основе графов.

В результате использование в СТ

ОиЛзЭлнС графовой методологии может, в свою очередь, служить фундаментом для решения оптико-электронных сетевых топологических задач в приборостроении. В работе [2] в рамках СТ ОиЛзЭлнС идентифицировано элементарное, т.е. близкое к основам классической топологии, гомеоморфное отображение фигуры в виде связного линейного графа в циклический граф. Построение циклического графа, в свою очередь, лежит в основе введения межэтапных прямых и обратных связей факторно-модельного синтеза ОиЛзЭлнС в результате перехода к полному графу [6]. Тем самым, происходит идентификация графовой топологической связности в рамках структурно-графового модельного языка научной проектно-технической инженерии.

Как уже отмечалось, в общем случае под фигурой в классической топологии понимается любое множество точек в самом широком смысле слова. Однако в этом множестве должно быть задано отношение близости между точками и некоторыми его подмножествами, удовлетворяющее ряду аксиом. В 1847 г. автор термина «топология» Листинг определил классическую топологию как учение о законах связности, взаимного положения и следования точек, линий, поверхностей, тел и их частей или их совокупности в пространстве, независимо от мер и величин. Тем самым он предвосхитил используемое в настоящее время понятие гомеоморфного преобразования фигуры.

Вторая трактовка термина топология просто обозначает некоторую дополнительную топологическую структуру определённого типа, называемую обычно просто топологией. Именно такой подход идентифицирует введённые понятия в виде топологии интегральной микросхемы и топологии функциональной оптической схемы. Построение топологической структуры лежит в основе определения топологического пространства в рамках общей, или теоретико-множественной топологии. Общая топология является одним из разделов классической топологии, в котором изучаются понятия «непрерывности» и «предела» в наиболее общем смысле

в рамках построения топологического пространства [11,12].

Исторически понятие топологического пространства появилось как обобщение функционального метрического пространства, базу топологии которого составляют открытые множества в виде шаров радиусом $r_{ш} > 0$. Топология, состоящая из таких открытых множеств (в простейшем случае интервалов) называется естественной (метрической) топологией.

Рассмотрим, как это выглядит на примере сигнального функционального метрического пространства S . Семейство T_S его подмножеств в виде открытых шаров, удовлетворяющее ряду аксиом, называется топологической структурой, или топологией. Иначе говоря, это семейство подмножеств изучаемого пространства, содержит произвольное объединение и конечное пересечение входящих в пространство элементов, а также изучаемое и пустое множества. Элементы семейства называются открытыми множествами. Пару (S, T_S) будем называть сигнальным топологическим пространством. Аналогично пара (Σ, T_Σ) идентифицирует преобразованное топологическое пространство. В результате идея гомеоморфной непрерывности интуитивно выражает коренные свойства одного из наиболее важных для инженерной практики класса топологических пространств – сигнальных функциональных метрических пространств. Они изучаются в рамках СТ ОиЛзЭлнС, как топологические пространства (S, T_S) и (Σ, T_Σ) бесконечномерных непрерывных функций (входных и выходных сигналов) с целью идентификации типовых сигналов.

При этом центральным топологическим объектом исследования в структурной теории служит триада $(S, \mathcal{P}_{пвд}, \Sigma)$, где $\mathcal{P}_{пвд}$ – непрерывное отображение входного топологического сигнального пространства S в преобразованное топологическое сигнальное пространство Σ . Главным средством сравнения триад становятся их непрерывные системно-поведенческие гомоморфизмы $\mathcal{P}_{пвд}$, моделирующие процессы преобразования сигналов.

Для этого классическая триадная непрерывная поведенческая связность топологических сигнальных пространств задаётся на основе (9) – (11) в виде стандартного преобразования сигнального пространства S в преобразованное пространство Σ с помощью оператора поведения $\mathcal{P}_{пвд}$, так что

$$(S, \mathcal{P}_{пвд}, \Sigma) \Rightarrow \mathcal{P}_{пвд} : S \rightarrow \Sigma, \text{ или } (s, \sigma = \mathcal{P}_{пвд}(s)). \quad (12)$$

В рамках разрабатываемого в структурной теории топологического подхода к ППС, как способа описания конфигурации оптоэлектронной сети, выражение (12) идентифицирует гомоморфный ППС в синтезируемой системной сети. Главной задачей общей топологии при исследовании этой триады $(S, \mathcal{P}_{пвд}, \Sigma)$, является выделение и изучение топологических инвариантов, или топологических свойств пространств. Инвариант – это характеристика топологического пространства, которая сохраняется при гомеоморфизме. Топологическое отображение не требует для своего определения никаких классических геометрических понятий типа расстояния, прямолинейности, гладкости. Поэтому к числу важнейших инвариантов относятся связность, размерность, вес, число кривых, ограничивающих данную область, возможность подсоединения линий связи только к элементам, либо друг к другу в любой точке или в определённых местах, эквивалентность, компактность и т.п. [11, 12].

В структурной теории особый интерес представляет сужение общего гомоморфного описания (12) реального ППС в топологически инвариантное гомеоморфное отображение в идеальной системе. Классическим примером гомеоморфизма сигнального функционального параметрического пространства S в преобразованное пространство Σ , рассматриваемых как топологические пространства непрерывных функций, является ППС в идеальной оптической изображающей системе. В итоге фигура из входного сигнального параметрического пространства S на выходе этой системы трансформируется в масштабированную геометрооптическую копию фигуры в преобразованном пространстве Σ ,

в которой отсутствуют дифракционные и геометрооптические аберрации [4]. Таким образом, гомеоморфное отображение идентифицирует идеальный ППС как взаимно однозначное и взаимно непрерывное отображение согласованных фигур (подмножеств сигналов). В результате, если два пространства в (12) гомеоморфны, то они имеют те же инвариантные характеристики и, прежде всего, фундаментальную характеристику структурной теории – связность. Именно такие гомеоморфизмы сигнальных пространств могут быть положены в основу описания топологических свойств факторно-модельного синтеза при идентификации ППС.

Образно говоря, геометрооптическая связность световых пучков и преобразующих элементов (ПЭ) состоит в том, что пучки «пролезают (протискиваются)» через оптические ПЭ (линзы, зеркала, призмы и т.п.). Поэтому для распространения излучения с минимальными потерями и искажениями симметрия пучка должна быть согласована с симметрией ПЭ в рамках прохождения типовых сигналов. На волновом языке любое ограничение волнового фронта приводит к дифракционным искажениям, т.е. к возмущениям типа сигналов. В результате для каждого ПЭ в рамках конкретной задачи оптимально связный пучок имеет волновой фронт в виде определённой суперпозиции плоских или сферических компонент.

ПОСТРОЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРНАРНОГО ПОВЕДЕНЧЕСКОГО ТИПА СИСТЕМЫ, ИДЕНТИФИЦИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА

Понятие непрерывного отображения (12) топологических пространств друг в друга, которое сохраняет связность, предполагает, что точки сигнальных пространств (сигналы и соответствующие им лучи) и множества точек (типы сигналов или пучки лучей) находятся в некотором интуитивно ясном отношении близости между точками и некоторыми подмножествами, отличным вообще говоря, от обычного отношения принадлежности. Это положение лежит в основе identifica-

ции типов сигналов, которая осуществляется с помощью формирующих типовые сигналы преобразующих элементов на основе групповой инвариантной связности точек (лучей) топологического сигнального пространства с пучками.

В рамках структурной теории аддитивная инвариантная связность в сигнальных пространствах идентифицирует групповую топологическую структуру (групповую топологию связности) в виде классов эквивалентности [5]. Как указано выше, идентификация на топологических пространствах S и Σ отношения эквивалентности приводит к заданию факторгрупп G_S/H и G_Σ/T . При этом отображение, ставящее в соответствие сигналам (точкам, элементам) s и σ классы эквивалентности S_r^H и Σ_r^T , которым они принадлежат, называется факторотображением, или отображением отождествления. Так как с учётом (9) исследуемые физические области D_S и D_Σ задаются при построении сигнальных пространств по умолчанию, их границы условны. Поэтому подмножества сигнальных пространств и сами сигнальные пространства являются открытыми, а их образы в виде классов эквивалентности при факторотображении также оказываются открытыми и задают фактор-топологию на факторгруппе. В результате факторгруппы представляют собой топологическое сужение сигнальных пространств с естественной топологией, задаваемой классами эквивалентности.

Логически способ определения простой топологии в заданном пространстве заключается в непосредственном указании тех семейств подмножеств этого пространства, которые образуют топологию. Этим семейством в случае факторотображения оказывается множество классов эквивалентности [11, 12].

Таким образом, фактор-топологические структуры, состоящие из классов эквивалентности сигналов S_r^H и Σ_r^T , задают отношение близости между точками (сигналами s и σ) и некоторыми подмножествами точек. Тогда подмножества точек, формирующих классы эквивалентности, как элементы сигнальных

факторгрупп $\mathbb{G}\mathbb{S}/\mathbb{H}$ и $\mathbb{G}\mathbb{\Sigma}/\mathbb{T}$, в структурной теории на языке фактор-топологии рассматривают как типы сигналов. В свою очередь, в рамках классической топологии фигура с таким отношением близости трактуется как топологическое пространство.

Задание типов сигналов формализует топологическую связность лучей и пучков, которую формируют преобразующие элементы системы. Топологическая идентификация ППС в ОиЛзЭлнС начинается с рассмотрения типов оптических сигналов как топологических инвариантов связности в рамках общей, или теоретико-множественной топологии. Базисными типами (классами) сигналов фактор-топологических структур, являются простейшие типы в виде аддитивно инвариантных подгрупп $\mathbb{H} \subset \mathbb{G}\mathbb{S}$ и $\mathbb{T} \subset \mathbb{G}\mathbb{\Sigma}$ (подполугрупп $\text{Semi}\mathbb{H}$ и $\text{Semi}\mathbb{T}$). Они состоят из типовых сигналов, симметрия которых согласована с симметрией ПЭ.

Для полной идентификации унарных типов сигналов в аддитивных сигнальных топологических пространствах \mathbb{S} и $\mathbb{\Sigma}$ на основе анализа модельных симметрий сформированы входная (сигнальная) $\mathbb{G}\mathbb{S}/\mathbb{H} = \{S_r^H\}$ и выходная (преобразованная) $\mathbb{G}\mathbb{\Sigma}/\mathbb{T} = \{\Sigma_\rho^T\}$ факторгруппы по аддитивным инвариантным подгруппам \mathbb{H} и \mathbb{T} [3-5]. Факторгруппы строят с помощью некоторого отношения эквивалентности, так что их элементами являются

классы эквивалентности, задающие входные и выходные унарные типы сигналов, в виде сигнального типа (S_r^H -СигналТипа) и преобразованного типа (Σ_ρ^T -ПреобрТипа). Типы сигналов формируются с помощью входного сигнального r и преобразованного сигнального ρ кодеров:

$$S_r^H = \{S\} = r + \mathbb{H} \text{ и } \Sigma_\rho^T = \{\sigma\} = \rho + \mathbb{T}. \quad (13)$$

Теперь при исследовании поведения топологических инвариантов связности ставится задача о том, когда топологическое пространство из одного данного класса можно представить как образ пространства из другого данного класса при непрерывном отображении $\mathcal{P}_{\text{пвд}}$ того или иного типа. Эта задача важна и естественна, ибо часто топологические пространства бывают даны, уже будучи связанными некоторыми непрерывными отображениями. Например, в структурной теории новое пространство строится как факторгруппа некоторого исходного топологического пространства.

Идентификация элементов топологической модели (ТплгМ 8), задающей состав и симметрию взаимосвязей унарных типов сигналов S_r^H и Σ_ρ^T , начинается с задания основного множества $\mathbb{B}_{\text{тплг}}$ элементов модели с учётом системно-поведенческого операторного идентификатора (*ОперИдент*) связности пространств \mathbb{S} и $\mathbb{\Sigma}$. В результате

$$\mathbb{B}_{\text{тплг}} = \begin{matrix} S_r^H\text{-СигналТип, } \mathcal{P}_{\text{пвд}}^{-1}[\Sigma_\rho^T]; & \mathcal{P}_{\text{пвд}}\text{-ОперИдент, } \mathcal{P}_{\text{пвд}}^{-1}\text{-ОперИдент;} \\ \mathcal{P}_{\text{пвд}}[S_r^H], & \Sigma_\rho^T\text{-ПреобрТип.} \end{matrix} \quad (14)$$

Введённое множество $\mathbb{B}_{\text{тплг}}$ содержит три дуальных топологически связных элемента: дуальный сигнальный тип, состоящий из унарного S_r^H -СигналТипа и обратного поведенческого образа $\mathcal{P}_{\text{пвд}}^{-1}[\Sigma_\rho^T]$; дуальный операторный идентификатор поведения системы, состоящий из прямого $\mathcal{P}_{\text{пвд}}$ -ОперИдент и обратного $\mathcal{P}_{\text{пвд}}^{-1}$ -ОперИдент; дуальный преобразованный тип, содержащий прямой поведенческий образ $\mathcal{P}_{\text{пвд}}[S_r^H]$ и унарный Σ_ρ^T -ПреобрТип. В результате на основе факторотображений в рамках структурной мо-

дели системы (4) осуществляется переход к факторизованному обобщению классического оператора поведения (12) с помощью трёх дуальных типов, так что

$$(\mathbb{G}\mathbb{S}/\mathbb{H}, \mathcal{P}_{\text{пвд}}, \mathbb{G}\mathbb{\Sigma}/\mathbb{T}) \Rightarrow \mathcal{P}_{\text{пвд}} : \mathbb{G}\mathbb{S}/\mathbb{H} \rightarrow \mathbb{G}\mathbb{\Sigma}/\mathbb{T}, \text{ или (дуальный СигналТип, дуальный ПреобрТип)} \\ = \mathcal{P}_{\text{пвд}} \text{ (дуальный СигналТип)}. \quad (15)$$

Окончательное построение ТплгМ тернарного поведенческого типа системы (Тернарн ПвднчТСист) осуществляется на основе объединения выражений (14) и (15).

В результате на множестве $\mathbb{B}_{\text{Тплг}}$ элементов модели задаётся тернарная поведенческая связность $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}$ дуальных типов. С этой целью

$$\begin{aligned} \text{ТплгМ}_{\text{ОиЛзЭлнС}}^{\text{ПвднчТ}} \stackrel{\Delta}{=} \text{ТернарнПвднчТ}_{\text{ОиЛзЭлнС}} = \langle \langle \mathbb{B}_{\text{Тплг}}; (S_r^H - \text{СигнлТип}, \mathcal{P}_{\text{ПВД}}[S_r^H]), \\ (\mathcal{P}_{\text{ПВД}}^{-1}[\Sigma_\rho^T], \Sigma_\rho^T - \text{ПреобрТип}), (S_r^H - \text{СигнлТип}, \Sigma_\rho^T - \text{ПреобрТип} = \mathcal{P}_{\text{ПВД}}[S_r^H]) \rangle \rangle. \end{aligned} \quad (16)$$

Содержанием ТплгМ ПвднчТипа системы являются три бинарных отношения между прообразами и образами унарных типов сигналов, описывающие факторизовано-групповую поведенческую связность элементов основного множества $\mathbb{B}_{\text{Тплг}}$ модели в рамках какой-либо реализации ППС. Если первое $S_r^H - \text{СигнлТип}, \mathcal{P}_{\text{ПВД}}[S_r^H]$ и второе $(\mathcal{P}_{\text{ПВД}}^{-1}[\Sigma_\rho^T], \Sigma_\rho^T - \text{ПреобрТип})$ бинарные отношения отражают внутреннюю групповую симметрию входного $\mathbb{G}\mathbb{S}$ и преобразованного $\mathbb{G}\Sigma$ топологических сигнальных подпространств с учётом свойств оператора поведения $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}$ системы, то третье отношение $(S_r^H - \text{СигнлТип}, \Sigma_\rho^T - \text{ПреобрТип} \stackrel{\Delta}{=} \mathcal{P}_{\text{ПВД}}[S_r^H])$ характеризует полное в смысле групповой симметрии инвариантное поведение системы.

В структурной теории ТплгМодель ПвднчТипа системы (16) отождествляется с самим ТернарнПвднч типом системы и имеет матрично-графовый вид (см. рис. 1). Таким образом, тип системы, представляющий собой тернарную конфигурацию дуального СигнлТипа, дуального операторного идентификатора поведения системы и дуального

вводят три бинарных отношения между сигнальными (входными) и преобразованными (выходными) унарными типами, так что

ПреобрТипа, идентифицируется как структурный критерий качества (СКК) системы.

Введение СКК системы является одним из фундаментальных результатов структурной теории [3, 7-10] и позволяет проводить оценку качества ППС в ОиЛзЭлнС, используя триадную конфигурацию подтипов системы (см. рис. 1). Иначе говоря, в теоретико-групповой трактовке задача оценки качества системы ставится, как задача исследования инвариантных свойств ППС на сигнальной $\mathbb{G}\mathbb{S}/\mathbb{H}$ и преобразованной $\mathbb{G}\Sigma/\mathbb{T}$ факторгруппах с учётом внутреннего строения моделей (6). Переход к реальной системе осуществляется в результате идентификации конкретных моделей для сигнальной факторгруппы, оператора поведения $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}$ и преобразованной факторгруппы. С этой целью в рамках графовой методологии факторно-модельного синтеза ОиЛзЭлнС произвольные точки фигуры функционального топологического пространства трактуются как графовые этапные вершины или элементы функционального метрического пространства (сигналы или модели).

<p><i>Дуально унарный сигнальный тип:</i></p> <p>унарный $S_r^H = \{s\} - \text{СигнлТип}$ и обратный поведенческий $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}^{-1}[\Sigma_\rho^T]$-образ</p>
<p><i>Системно-поведенческий операторный идентификатор (ОперИдент):</i></p> <p>прямой $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}$-ОперИдент и обратный $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}^{-1}$-ОперИдент</p>
<p><i>Дуально унарный преобразованный тип:</i></p> <p>прямой поведенческий $\mathcal{P}_{\text{ПВД}}[S_r^H]$-образ и унарный $\Sigma_\rho^T = \{\sigma\} - \text{ПреобрТип}$</p>

Рисунок 1.

Тернарное матрично-графовое представление ТплгМодели поведенческого типа системы в виде структурного критерия качества (СКК) ОиЛзЭлнС

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, построение ТплгМ ТернарнПвднчТипа ОиЛзЭлнС – это следствие главного достоинства структурно-групповой топологической факторизации сигнальных пространств, в результате которой конфигурируются в определенном смысле простейшие типы системы (см. рис. 1). Такой взгляд на поведение системы лежит в основе оценки качества, позволяет рассматривать ТернарнПвднчТип (16) как особый принципиально новый структурный критерий качества (СКК) системы. В результате на основе частных случаев симметрии структурной и поведенческой связности упорядоченных классов входных и преобразованных сигналов формируется топологическое единство сигнального мира.

Иначе говоря, в рамках ТплгМ ТернарнПвднчТипа системы на формальном теоретико-групповом топологическом языке идентифицируется внутренняя симметрия ППС (симметрия инвариантного поведения системы), выделяются входные и преобразованные типы сигналов, лежащие в основе СКК, и становятся понятными содержание и оттенки поведенческой (функционально-преобразующей) связности, задаваемой оператором поведения системы.

Примеры оценки качества ППС в ОиЛзЭлнС по методу типовых сигналов на основе СКК рассматриваются во второй части статьи.

Список литературы:

1. Немтинов В.Б. Сериков В.Ю. Структурно-графовая методология в задачах анализа и синтеза оптико-электронных систем // Контенант, 2014, т 13, №4. С. 12-26.
2. Немтинов В.Б. Сериков В.Ю. Графовая идентификация научной проектно-технической инженерии для разработки и апробации оптико- и лазерно-электронных приборов // Контенант, 2015, т 14, №2. С. 3-19.
3. Немтинов В.Б. Докторская диссертация на тему «Структурная теория и математическое моделирование ОиЛзЭлнС» 2004 // <http://www.dissercat.com/content/strukturnaya-teoriya-i-matematicheskoe-modelirovanie-optiko-i-lazerno-elektronnykh-sistem#ixzz2stxrYkAa>.
4. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. – М.: Машиностроение, 1990. – 432с.

5. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б. Преобразование сигналов в оптико-электронных приборах систем управления летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1980. – 176с.

6. Немтинов В.Б. Графовые маршрутизаторы прямых и обратных связей, как между этапами синтеза, так и между и параметрами оптического пучка. Межд. конф. «Прикладная оптика 2014»: Сб. Трудов ОптичОбщества на Элн Диске. Секция «Оптическое приборостроение. Компьютерное моделирование». С-Пб., 2014. С. 171–175.

7. Немтинов В.Б. Групповые свойства голограмм // Материалы VII Вс. школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1975. – С. 102-117.

8. Немтинов В.Б. Теоретико-групповая модель абстрактного голографического процесса // Материалы IX Вс. школы по голографии. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1977. – С. 52-83.

9. Немтинов В.Б. Структура и качество голографического процесса // Голография и оптическая обработка информации: методы и аппаратура. – Л.: ЛИЯФ АН СССР, 1980. – С. 65-71. (Материалы XII Вс. школы по голографии).

10. Немтинов В.Б., Волосатова Т.М. Качество оптических фурье-преобразующих структур // Оптико-электронные методы обработки изображений / Под ред. С.Б.Гуревича, Г.А.Гаврилова. – Л.: Наука, 1982. – С. 190-202.

11. Александров П.С. Введение в теорию множеств и общую топологию – М.: Наука, 1977. – 370с.

12. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1968. – 496с.

13. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений. Теория передачи изображений и ее приложения. – М.: Радио и связь, 1986. – 248с.

14. Карамзин Ю.Н., Сухоруков А.П., Трофимов В.А. Математическое моделирование в нелинейной оптике. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 154с.

15. Компьютеры в оптических исследованиях / Р.Баракат, У.Даллас, Б.Фриден и др., Пер. с англ.; Под ред. С.А.Ахманова. – М.: Мир, 1983. – 488с.

16. Гуревич С.Б. Эффективность и чувствительность телевизионных систем. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 344с.

17. Норенков И.П. Автоматизированные информационные системы: учеб. пособие / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 342с.

18. Большой энциклопедический словарь. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Большая российская энциклопедия, 1998. С. 1213.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПРОТОКОЛА ИНФОРМАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ И БОРТОВОЙ СИСТЕМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

ШАПИРО Б.Л., СУХАЧЕВ А.Б., ПЕРЧАТКИН Н.А., ДЕРЖАВИН Д.С., НИКИТИН Н.Ю.

ЗАО «МНИТИ», г. Москва

E-mail: abs1948@yandex.ru

В работе показано структурирование процесса разработки протокола информационного взаимодействия между оптико-электронной системой наблюдения и бортовой системой управления, входящих в состав беспилотного летательного аппарата основанное на применении базовых определений общей теории систем.

Ключевые слова: общая теория систем, протокол информационного взаимодействия, интерфейс передачи данных, информационное взаимодействие, оптико-электронная система, беспилотные летательные аппараты.

ВВЕДЕНИЕ

В современных комплексах беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для обеспечения управления всех подсистем большое значение имеет организация информационного обмена между оптико-электронной системой наблюдения и бортовой системой управления [1]. основополагающей технической составляющей, определяющей порядок и логику информационного обмена, является протокол информационного взаимодействия (ПИВ).

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПИВ

Основными принципами формирования ПИВ являются:

- определение состава и направления потоков информационного обмена,
- выбор интерфейса передачи данных,
- определение состава абонентов системы передачи данных,
- определение оптимального темпа передачи данных для каждого этапа выполнения полетного задания,

– согласование объемов передачи данных в заданный промежуток времени.

Выбор интерфейса передачи данных осуществляется, исходя из ряда критериев:

1. Требований технического задания.
2. Доступности элементной базы для реализации данного интерфейса.
3. Требуемой скорости передачи данных (количество переданных бит за секунду) от одной подсистемы к другой.
4. Пропускной способности канала передачи данных.
5. Защищенности интерфейса от внешних воздействий.

На текущий момент времени наиболее распространенными интерфейсами передачи данных, с гальванической связью между абонентами, являются CAN, Ethernet, Manchester-II и пр.[2] Все перечисленные типы интерфейсов характеризуются:

- простотой реализации,
- широкой доступностью элементной базы,
- высокими скоростными характеристиками передачи данных,

– высокой надежностью и защищённостью данных интерфейсов и каналов передачи данных построенных на их основе.

В случае построения высокоскоростных волоконно-оптических линий передачи данных, так же применяется Fibre Channel интерфейс. Однако введу сложности его реализации и высокой стоимости оборудования, данный интерфейс получил наибольшее распространение в суперкомпьютерах и системах хранения данных. Сравнительный анализ [2] характеристик трех указанных выше интерфейсов показывает, что наиболее подходящим для проектирования каналов передачи данных в системах БПЛА является интерфейс Манчестер-II. К особенностям данного интерфейса можно отнести [3]:

1. Возможность самосинхронизации.

2. Максимальную плотность данных (по сравнению с остальными интерфейсами) на единицу частоты.

Данные особенности позволяют оптимальным образом использовать канал передачи данных между электронными устройствами, входящими в состав бортового оборудования БПЛА.

В настоящее время в системах управления БПЛА применяются вычислители серии «Багет» (процессоры общего назначения, Intel 486).

Основным плюсом вычислительных модулей, построенных на процессорах общего назначения является их гибкость, так как основные алгоритмы работы подсистем БПЛА

реализуются программно. А минусом – низкая (по сравнению со специализированными процессорами) скорость специальной обработки поступающих данных. Возможным способом повышения скорости обработки данных, является применение специализированных процессоров. Такой подход используется при построении современных систем БПЛА и позволяет увеличить скорость обработки данных.

Согласование передачи данных между подсистемами в системе информационного обмена БПЛА, осуществляется посредством соглашения между проектировщиками подсистем, зафиксированного в ПИВ. Принципы построения ПИВ на текущий момент времени не регламентированы и зависят от квалификации, опыта и навыков специалистов, задействованных в подготовке ПИВ. Одним из возможных способов упорядочения процесса разработки протокола информационного взаимодействия является применение методов общей теории систем.

ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

Согласно общей теории систем (ОТС) под системой подразумевается группа из двух и более постоянно взаимодействующих между собой тел [4]. Данное определение является слишком общим и не учитывает всего многообразия систем, существующих в природе. В [4, 5] была предложена классификация систем, приведенная на рис. 1.



Рисунок 1.

Общая классификация систем

Кроме классификации в [8] введены понятия подсистемы, внешней среды и открытой системы определены как:

– внешняя среда – это совокупность сил и явлений живой и не живой природы влияющих на функционирование рассматриваемой системы,

– подсистема – это одно из тел, входящих в состав системы и состоящих из одного или нескольких тел, непрерывно взаимодействующих между собой или внешней средой,

– открытая система – это группа из двух или более подсистем непрерывно взаимодействующих между собой и внешней средой.

Приведенные определения и классификация систем позволяет рассматривать бортовые устройства БПЛА как технические подсистемы, состоящей из нескольких постоянно взаимодействующих между собой устройств. Постоянство взаимодействия между устройствами, входящими в состав БПЛА, обеспечивается за счет:

- непрерывности электропитания бортовых устройств;

- обеспечения информационного обмена между устройствами.

При построении модели системы БПЛА следует также учитывать, что назначение БПЛА предполагает:

– конечное время его существования (от момента запуска устройства до момента достижения точки интереса или возвращения),

– перемещение БПЛА осуществляется в воздушной среде под влиянием различных воздействий в том числе, электромагнитных и гравитационных полей.

Устройства, входящие в состав БПЛА, условно можно разделить по их функциональному назначению:

1. Устройства управления БПЛА.
2. Устройства доставки к точке интереса.
3. Устройства наведения на точку интереса.
4. Устройства получения информации от оптико-электронной системы (ОЭС) и навигационной информации (ИНС, СНС) и пр.
5. Датчики, позволяющие фиксировать состояние систем БПЛА.

Классификация устройств, входящих в состав БПЛА представлена на рис. 2 [5, 6, 7].

Отличие реальной системы от идеальной заключается в наличии внешней среды в которой находится система, наличие взаимодействия между системой и внешней средой и возможность декомпозиции системы на составные части каждая из которых несет свою функциональную нагрузку и взаимодействует с остальными частями системы и внешней средой. Следовательно, есть три основные составляющие отличающие идеальную модель системы от реальной:

1. Взаимодействие системы с внешней средой.

2. Взаимодействие подсистем между собой.

3. Взаимодействие подсистем с внешней средой.

Исходя из выше изложенного, можно сделать вывод, что БПЛА является технической системой, состоящей из ряда подсистем, непрерывно взаимодействующих между собой и с внешней средой.



Рисунок 2.
Устройства, входящие в состав комплекса управления БПЛА

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПИВ С УЧЕТОМ ОПРЕДЕЛЕНИЙ ОЭС

С учетом подходов общей теории систем при разработке протокола информационно-взаимодействия необходимо определить между какими подсистемами происходит информационное взаимодействие. В данной работе в качестве примера будут рассматриваться две подсистемы:

1. Бортовая подсистема управления (БСУ);
2. Оптико-электронная подсистема наблюдения (ОЭС).

Обе подсистемы являются открытыми и взаимодействуют с внешней средой. В качестве внешней среды выступает воздушная среда с заданными параметрами температуры, с возможным повышенным влиянием электромагнитного поля. Информационное взаимодействие подсистем между собой будет осуществляться по мультиплексному каналу передачи данных через интерфейс Манчестер-II. Такой тип информационного взаимодействия регламентируется ГОСТ Р 52070-2003 [9]. Рассмотрим только несколько терминов, применяемых в [9] необходимых для дальнейшего понимания методологии построения ПИВ:

1. *Информационная магистраль* – физическая линия передачи информации, обеспечивающая связь устройств интерфейса между собой и состоящая из общей магистральной шины и ответвителей.

2. *Магистральная шина* – часть информационной магистрали, состоящая из последовательно соединенных через разветвители отрезков кабелей и двух согласующих резисторов шины на её концах.

3. *Ответвитель* – часть информационной магистрали, обеспечивающей связь устройства интерфейса с магистральной шиной.

4. *Устройство интерфейса* – интерфейсный модуль, обеспечивающий передачу информации по информационной магистрали, сопряжение с ней контроллера шины или оконечного устройства.

5. *Контроллер шины* – устройство интерфейса, управляющее обменом информации в интерфейсе (КШ).

6. *Оконечное устройство* – устройство интерфейса, функционирующее в соответствии с командами контроллера шины (ОУ).

В соответствии с [9] поток информации, передаваемый по информационной магистрали, должен состоять из сообщений, содержащих командное слово (КС – информационное слово, содержащее 20 разрядов и передаваемое только от КШ к ОУ), ответное слово (ОС – информационное слово, содержащее 20 разрядов и передаваемое только от ОУ) и слово данных (СД – информационное слово, содержащее 20 разрядов из которых 16 разрядов отводится под информацию полученную ОУ в результате выполнения своих функциональных задач.). Под пакетом данных будем понимать некоторое количество 20 разрядных (в соответствии с [9] минимум 1, максимум 32) информационных слов принимаемых или передаваемых КШ или ОУ за один такт обмена информацией. Более подробно параметры передачи данных, физическая организация канала и основные определения, применяемые при построении канала передачи данных на основе интерфейса Манчестер-II отражены в [9].

В ПИВ отражается функциональная нагрузка, наложенная на подсистему, и перечень данных передаваемых между БСУ и ОЭС, в том числе:

- реакция ОЭС на изменения, происходящие во внешней среде,
- режимы функционирования и передачи данных между БСУ и ОЭС,
- время, отводимое под каждый из режимов функционирования ОЭС и БСУ.

Формирование реакции открытой подсистемы на изменения, происходящие во внешней среде, должно осуществляться на физическом уровне и отражаться отдельно в слове признаков под которое отводится отдельное слово данных (СД) в передаваемых от БСУ к ОЭС или от ОЭС к БСУ пакетах (с учетом [9]).

Основной частью при построении ПИВ является точное расписание команд, подаваемых БСУ и выполняемых ОЭС (циклограмма взаимодействия). В циклограмме

отражается время, отводимое окончному устройству на каждый из режимов функционирования, действия выполняемые ОЭС в данном режиме, и ответная реакция БСУ на выполненные (или не выполненные) действия. Само понятие «режим работы» связано с несколькими основными моментами:

- реакция ОЭС на действия БСУ,
- подача питания на БПЛА от носителя или запуск системы,
- температура окружающей среды,
- параметры электромагнитного поля в котором предстоит работать изделию,
- временная задержка, возникающая при формировании ответной реакции подсистемы,
- функциональное назначение данной подсистемы во всей системе.

В соответствии с изложенным можно выделить минимум четыре основных режима реализуемые окончным устройством:

1. Режим загрузки реакция подсистемы на подачу питания (реализуется от момента подачи питания на ОЭС до времени t_1).

2. Режим самодиагностики (реализуется от момента времени t_1 до момента времени t_2).

3. Дежурный режим (наличие или отсутствие дежурного режима функционирования определяется эксплуатационными требованиями к рассматриваемой системе. Реализуется от момента времени t_2 до момента времени t_3).

4. Режим работы (реализуется от момента времени t_3 до достижения БПЛА точки интереса).

В зависимости от режимов работы ОЭС и БСУ и внешних условий характер передаваемых и принимаемых информационных пакетов будет изменяться. При построении циклограммы за начальный момент времени принимается момент подачи питания на ОЭС. В течение времени t_1 информационный обмен между БСУ и ОЭС отсутствует. По окончании загрузки систем ОЭС начинается информационный обмен между БСУ и ОЭС. БСУ направляет ОЭС пакет данных с определенным режимом функционирования

ОУ. При установке режима самотестирования ОЭС в ответном пакете подтверждает переход в режим самотестирования и начинает сам процесс самотестирования. По прошествии времени $t_2 - t_1$, окончное устройство направляет пакет данных в которых отражены результаты самотестирования окончного устройства. БСУ получив ответный пакет, принимает решение об отключении ОЭС (в случае неблагоприятного результата контроля) или перевод его в другой режим работы (при благоприятном результате контроля). В процессе длительного (по времени) движения БПЛА к точке интереса, после получения положительного результата самоконтроля, наиболее оптимальным было бы перевести ОЭС в дежурное состояние с понижением электропотребления последнего. При этом информационный обмен переходит в состояние, когда контроллер шины передает пакеты данных, но ОЭС на них отвечает только подтверждением режима функционирования. Через время $t_3 - t_2$ БСУ передает признак перехода в следующий режим функционирования ОЭС. На последнем участке движения БПЛА к точке интереса БСУ переводит ОЭС в режим «Работа» (режим распознавания и сопровождения объекта), и ОЭС выполняет все возложенные на неё функциональные задачи. В процессе обмена информационными пакетами возможно наличие реакции самого ОЭС на возникающие в пакетах данные и изменения параметров внешней среды, что повлияет на циклограмму. На рис. 3 приведен способ представления циклограммы в зависимости от режимов работы и параметров внешней среды.

Построение циклограммы может быть осуществлено на разных уровнях абстракции и детализации и зависит от требований, предъявляемых к протоколу информационного взаимодействия в рамках конкретной работы.

Рассмотрев процесс информационного обмена с позиции общей теории систем, можно выделить некоторые основные блоки, которые должны присутствовать в



Рисунок 3.

Пример построения циклограммы в случае учета влияния на оконечное устройство параметров внешней среды:

состояние 1 – циклограмма взаимодействия ОЭС с БСУ при пониженной температуре, состояние 2 – циклограмма взаимодействия ОЭС с БСУ при нормальной температуре, состояние 3 – циклограмма взаимодействия ОЭС с БСУ при повышенной температуре

протоколе информационного взаимодействия по мультиплексному каналу передачи данных:

1. Описание физического взаимодействия между абонентами (например, БСУ и ОЭС): описание технических характеристик информационной магистрали, наличие или отсутствие резервирования канала передачи данных, тип подключения оконечного устройства к магистральной шине, характеристики питания оконечного устройства, скорость передачи данных (количество бит информации в секунду) в разных режимах работы, описание уровня 0 и 1 в сигнале.

2. Описание информационного взаимодействия: описание пакета данных, описание командного слова, слова данных и ответного слова, определение задействованных в анализе разрядов командных слов, слов данных и ответных слов в соответствии с [9], описание задействованных разрядов, выбор форматов передаваемых пакетов, описание данных входящих в состав пакетов, ввод слова признаков и описание разрядов, входящих в его состав.

3. Описание циклограммы взаимодействия: выделение режимов функционирования

оконечного устройства, выделение критических параметров внешней среды влияющих на функционирование ОУ, построение временных циклограммы передачи данных для различных режимов работы, построение циклограммы с учетом влияния критических параметров внешней среды, описание режимов функционирования ОЭС с учетом реакции БСУ, описание критических параметров внешней среды и отклика ОЭС на воздействие данных параметров, описание циклограммы передачи данных для различных режимов работы, описание циклограммы с учетом влияния критических параметров внешней среды.

4. Описание функций подсистем в соответствии с [9]: выполняемые ими роли, возможности перепрограммирования устройств, входящих в состав конечного изделия.

Данный перечень является достаточным для описания основных частей ПИВ. В зависимости от разрабатываемого изделия и особенностей его построения данная структура может расширяться и видоизменяться в зависимости от функций, возложенных на подсистему.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методологии общей теории систем при построении протоколов информационного взаимодействия устройств, входящих в состав беспилотных летательных аппаратов, позволяет выделить основные подсистемы и определить характер их взаимодействия между собой. Учет влияния внешней среды при проведении системного анализа способствует уточнению реакций подсистем на внешнее воздействие со стороны объектов живой и неживой природы, в частности электромагнитных полей и влияние температуры. Изменение уровней абстракции при рассмотрении выделенных подсистем и определение типов связи между ними способствует оптимизации процесса формирования структуры протокола информационного взаимодействия, как по формальному признаку, так и по возможности распределения информационных ресурсов по выделенным циклам функционирования системы. В целом такой подход позволяет оптимизировать работу подсистемы, выделить интервалы критического влияния того или иного параметра внешней среды, предусмотреть ответную реакцию подсистемы на возникновение данных параметров, оптимизировать параметры передачи данных и сократить время, затрачиваемое на разработку ПИВ.

Список литературы:

1. Вилкова Н.Н., Евстигнеев В.Г., Лебедев В.Д., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Некоторые аспекты информационного обмена в комплексе управления беспилотным летательным аппаратом // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. №1,2. 2012 – с. 28-31
2. Латин А.А. Интерфейсы. Выбор и реализация. – М.: «Техносфера», 2005. – 168 с.
3. <http://compress.ru/Archive/CP/2002/2/1>
4. Садовский В.Н., Юдин Э.Г. Исследования по общей теории систем. – М.: Прогресс, 1969. – 521 с.
5. Сухачев А.Б. Исследование возможности оптимизации параметров комплекса управления БЛА с точки зрения обеспечения устойчивого двухстороннего обмена информацией // Вестник Академии военных наук, №3 (28) 2009 (спецвыпуск), Москва, с. 38-42.
6. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2008. – 456 с.
7. Мушник Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений.: Пер. с нем. -М.: Мир, 1990. – 208 с.
8. Пригожин И., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант. — М.: Прогресс, 1994. — 266 с.
9. ГОСТ Р 52070-2003

ОХЛАЖАЕМЫЕ ФОТОПРИЁМНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

КАРПОВ В.В., КОЗЫРЕВ М.Е., КУЗНЕЦОВ Н.С., МАРУЩЕНКО А.В.

Открытое акционерное общество «Швабе-Фотосистемы», г. Москва

E-mail: info@shvabe-fs.ru

В статье приводятся результаты исследований по разработке охлаждаемых фотоприемных устройств для дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: фотоприемник, фотоприемное устройство, радиационная система охлаждения, микрокриогенная система, газовая криогенная машина, температура криостатирования, холодопроизводительность.

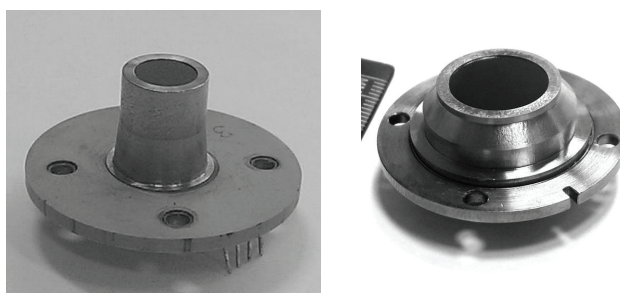
ОАО «Швабе-Фотосистемы» - крупнейший в России производитель полупроводниковых фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ) для приборов ИК-техники различного назначения, особое место среди них занимают охлаждаемые ФП и ФПУ для аппаратуры дистанционного зондирования Земли, применяемые в интересах различных отраслей промышленности:

- нефтегазового комплекса (контроль трубопроводов и разведка месторождений);
- геологии (разведка рудных и нерудных месторождений, а также геотермальных вод);
- энергетики (обнаружение предаварийного состояния крупных энергетических блоков);
- городского хозяйства (обнаружение аварийных участков горячего водоснабжения и др.);
- лесного хозяйства (зарождение лесных пожаров, очаги поражения леса вредителями);
- метеорологии (содержание воды и углекислого газа в атмосфере, зарождение и движение ураганов);
- сельского хозяйства (созревание хлебов, распространение вредителей сельскохозяйственных культур);
- водного транспорта (проводка судов по морскому пути);
- строительство (обнаружение карстовых пустот в районах массовой застройки);

- экологии (тепловое загрязнение рек, промышленные выбросы в атмосферу).

В ОАО «Швабе-Фотосистемы» разработаны конструкции двух разновидностей охлаждаемых ФП и ФПУ: малоэлементных, работающих с радиационными системами охлаждения (РСО), и многоэлементных, работающих с газовыми криогенными машинами (ГКМ) на основе различных термодинамических циклов.

ФП, применяемые с РСО (рис. 1), имеют такие достоинства, как высокая надежность, простота конструкции, работа без потребления электроэнергии, большой срок службы (несколько лет). Однако применение таких ФП ограничивается располагаемой холодопроизводительностью РСО (как правило, не выше 0,4 Вт).



*Рисунок 1.
Фотоприемники, применяемые с РСО*



Рисунок 2.
ФПУ «Даль-ИК»

Фотоприемники, применяемые с ГКМ, имеют, обычно, большой диаметр фотозоны (до 50 мм), длинный фоновый экран (диафрагму), и как следствие, увеличенную величину теплопритока (1,3-1,7 Вт и более для уровня 77 К).

В качестве ГКМ наибольшее распространение получили машины Стирлинга, они имеют наивысший КПД среди ГКМ различных типов и наиболее компактны. Конструктивно ГКМ, которая включает в себя компрессор, микротеплообменник (МТО) и блок управления, может выполняться как по интегральной схеме (МТО находится на теле компрессора), так и по отдельной схеме, так называемой схеме Сплит-Стирлинг (МТО вынесен отдельно и соединен с компрессором трубопроводом длиной 250-300 мм), которая по-

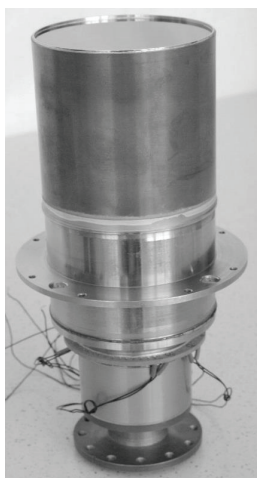


Рисунок 3.
ФПУ «Байкал»

зволяет изменять расположение МТО в пространстве, а, следовательно, и фотоприемника, относительно компрессора.

К достоинствам ГКМ можно отнести сравнительно малые габариты (по сравнению с холодильниками-излучателями РСО), возможность реализации достаточно низких температур охлаждения ФПУ (65 - 77 К), время вывода ФПУ на рабочий режим составляет несколько минут (по сравнению с десятками минут у РСО). Недостатком ГКМ является сравнительно малый ресурс (не более 7000 – 10000 часов работы).

За последние годы в ОАО «Швабе-Фотосистемы» (бывший Московский завод «Сапфир») разработано несколько типов ФПУ с большим диаметром фотозоны, среди которых «Даль-ИК» (рис. 2), «Байкал» (рис. 3), «Байкал-М» и др. Конструкция этих ФПУ основывается на базовой конструкции криостата (рис. 4), основные узлы, которого являются одинаковыми для всех вариантов исполнения:

- корпус с газопоглотителями;
- крышку с входным окном;
- держатель (держатели) с закрепленным на нем керамическим наконечником, который является посадочным местом для фоточувствительных модулей;
- крупногабаритный фоновый экран (диафрагма).

ФПУ подобного класса обладают большими-

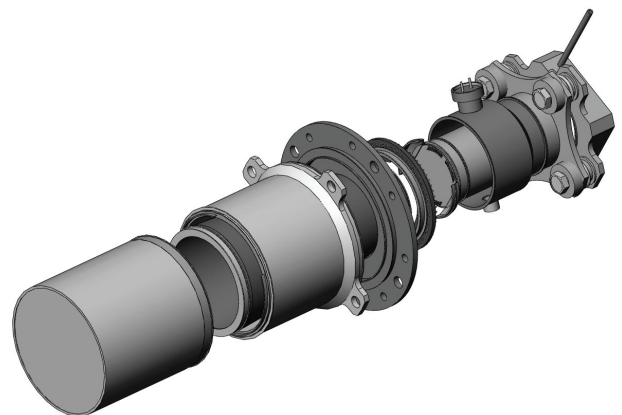


Рисунок 4.
Базовая конструкция вакуумного криостата

Таблица 1.

№ п/п	Индекс МКС	Фирма	Q, Вт	T _{кр} , К
1	K535	Ricor (Израиль)	5	65
2	LSF 9599	Thales (Нидерланды-Франция)	2,3	80
3	LSF 9189	Thales (Нидерланды-Франция)	3,0	80
4	M16	Cryodynamics (США)	8,15	77
№ п/п	Индекс МКС	Фирма	Q, Вт	T _{кр} , К
5	7044H	Hughes (США)	3,5	80
6	M77	Sunpower (США)	5	77
7	МСМГ-5А-1,3/80	НТК «Криогенная техника» (РФ)	1,3	80
8	МСМГ-6А-1,3/80	НТК «Криогенная техника» (РФ)	1,3	80
9	МСМГ-5А-1,7/80	НТК «Криогенная техника» (РФ)	1,7	80

Примечание: Q – максимальная холодопроизводительность ГКМ;

T_{кр} – температура криостатирования фоточувствительных элементов

ми теплопритоками (свыше 1,5 Вт). Для криостатирования подобных ФПУ требуются ГКМ с холодопроизводительностью выше 1,5 Вт.

В табл. 1 представлены характеристики ГКМ импортного и отечественного производства.

Из табл. 1 следует, что ГКМ отечественного производства, в отличие от импортных, при обычной комплектации сборки (одно ФПУ + одна ГКМ) могут обеспечить нормальное функционирование ФПУ с теплопритоками не выше 1,7 Вт. Отсюда следует важный вывод. Поскольку отечественные ГКМ обладают недостаточной холодопроизводительностью для обеспечения заданных режимов криостатирования ФПУ с теплопритоками, например, более 2 Вт, то представляется актуальным исследование возможности создания на основе отечественных машин малой холодопроизводительности альтернативных вариантов составных микрокриогенных систем, состоящих например, из двух или трех ГКМ. Это позволит решить задачу импортозамещения.

В ОАО «Швабе-Фотосистемы» были выполнены комплексные расчетные и экспериментальные исследования технологических возможностей создания системы охлаждения

из нескольких ГКМ малой холодопроизводительности, для охлаждения одного ФПУ с теплопритоком более 2 Вт.

Суть технического решения заключается в том, что холодные пальцы двух или трех машин, применяемых в системе, замкнуты на растр ФПУ, на котором расположен фоточувствительный модуль. При этом, используя машины различных классов, можно достигать заданных значений суммарной холодопроизводительности системы на уровне температур криостатирования 77 К и ниже.

Из всех рассмотренных вариантов конструкции ФПУ рекомендованы к дальнейшему изучению следующие варианты:

- ФПУ с МКС на основе трех ГКМ МСМГ-3В-1/80 (суммарная холодопроизводительность 2,4 Вт);

- ФПУ с МКС на основе трех ГКМ «Сапфир-МКС» (суммарная холодопроизводительность 1,8 Вт);

- ФПУ с МКС на основе трех ГКМ «МКС-ШФС» (суммарная холодопроизводительность 3,0 Вт).

ГКМ «Сапфир-МКС» (аналог ГКМ K508 фирмы Ricor) и «МКС-ШФС» (аналог ГКМ K548 фирмы Ricor) созданы в ОАО «Швабе-Фотосистемы» в рамках решения задачи импортозамещения.

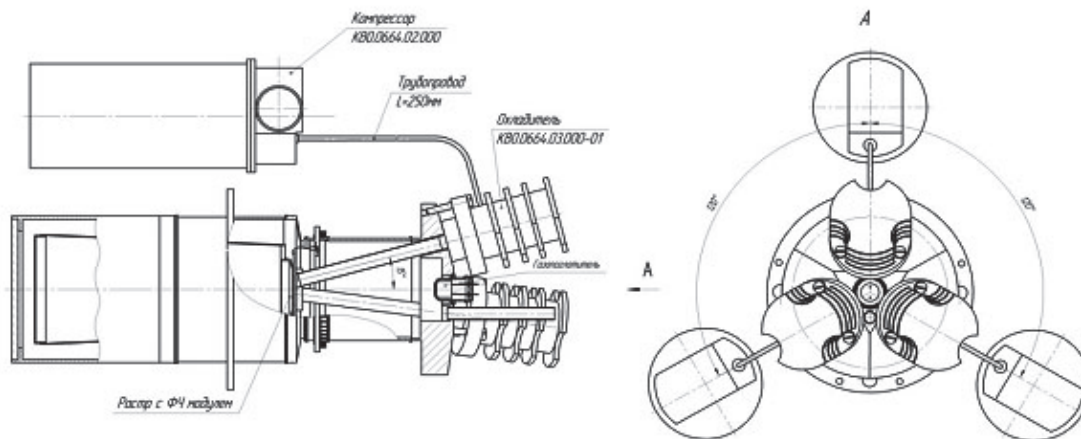


Рисунок 5.
Схема ФПУ для стыковки с тремя ГKM 2-го класса



Рисунок 6.
Опытный образец ФПУ, состыкованный с двумя ГKM 2-го класса (МСМГ-3В-1/80)

На рис. 5 показана схема ФПУ, предназначенного для работы с тремя ГKM 2-го класса (МСМГ-3А-0,6/80 и МСМГ-3В-1/80), а на рис. 6 представлен внешний вид опытного образца этого ФПУ, состыкованного с двумя ГKM МСМГ-3В-1/80.

На рис. 7 представлен вариант конструкции ФПУ с тремя гильзами-держателями под установку ГKM «Сапфир-МКС». Аналогичная схема применяется и для ФПУ, стыкуемого с тремя ГKM «МКС-ШФС».

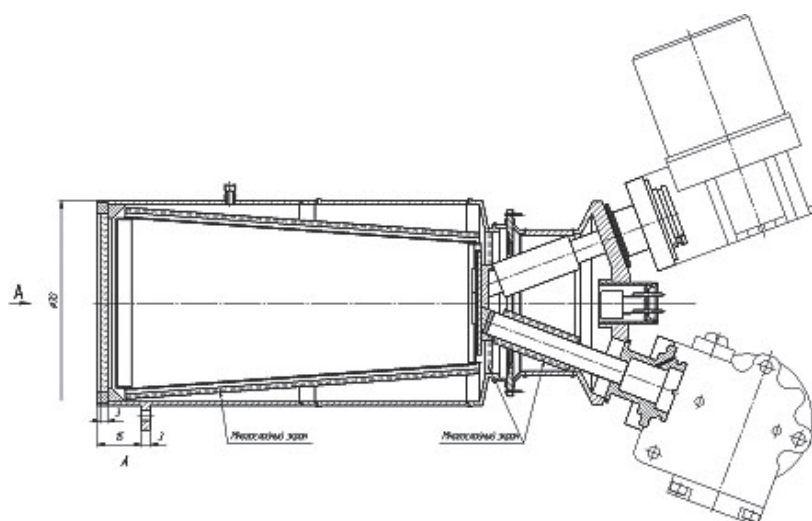


Рисунок 7.
Схема ФПУ для стыковки с тремя ГKM «Сапфир-МКС»

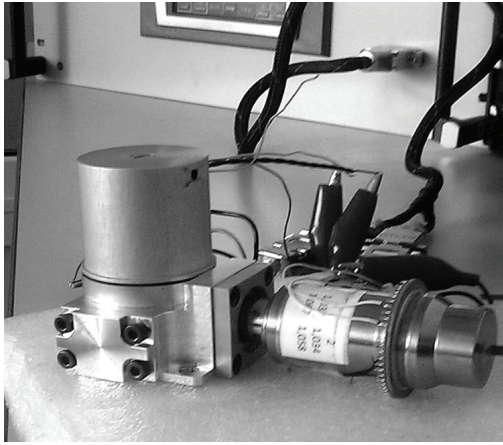


Рисунок 8.
ГКМ «Сапфир-МКС», состыкованная с тепловым имитатором ФПУ

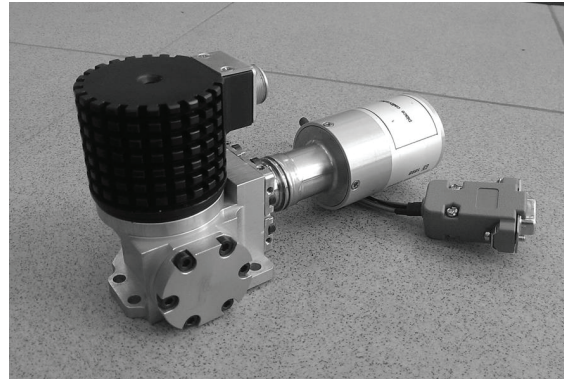


Рисунок 9.
ГКМ «МКС-ШФС», состыкованная с тепловым имитатором ФПУ

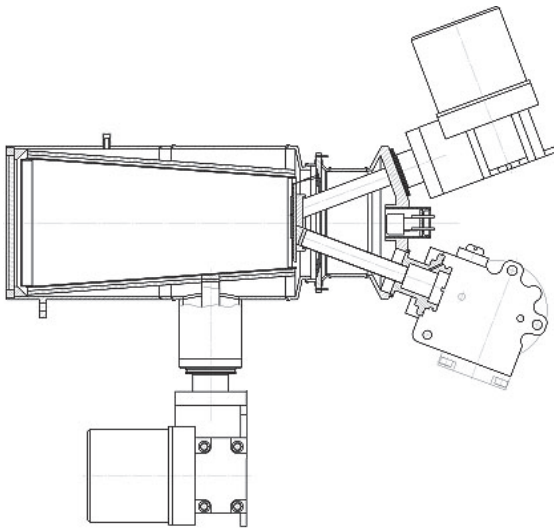


Рисунок 10.
Схема ФПУ с отдельным охлаждением раstra и экрана

На рис. 8 - 9 представлены образцы ГКМ «Сапфир-МКС» и «МКС-ШФС».

Наиболее перспективной с точки зрения расширения диапазона температур криостатирования ФПУ является схема с отдельным охлаждением раstra и фоновозащитного экрана (рис. 10). В этом варианте для ох-

лаждения экрана можно использовать ГКМ «МКС-Сапфир». Растр ФПУ, в свою очередь, можно охлаждать с помощью 2-х или 3-х машин «МКС-ШФС», что позволяет достигнуть температуры криостатирования фоточувствительного модуля 65-70 К.

Хотя ресурс работы рекомендованных ГКМ невелик и лежит в пределах от 5000 до 10000 часов, но при соответствующем выборе циклограмм работы космической аппаратуры, а также очередности работы машин, общее время работы ФПУ с составной МКС в штатных условиях может составить несколько лет, что вполне подходит для космических применений.

В настоящее время в ОАО «Швабе-Фотосистемы» проводится экспериментальная отработка макетных образцов ФПУ, способных работать с предложенными вариантами составной системы охлаждения на основе отечественных ГКМ малой холодопроизводительности. В дальнейшем предполагается отработать алгоритмы управления подобными системами охлаждения при моделировании различных вариантов циклограмм функционирования ФПУ в приборах штатного применения.

МИНИАТЮРНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

КАРЕВ П.В.

ООО «Промышленная метрология», г. Санкт-Петербург

E-mail: karev_p@metrology-spb.ru

Пьезоактуаторы начали применяться в активной оптике в космосе. Цель этой статьи состоит в описании некоторых современных примеров применения. Пьезоактуаторы обладают привлекательными свойствами для космических применений. Они обеспечивают точное позиционирование, не требуют смазки, обладают немагнитными свойствами, являются малогабаритными и демонстрируют низкое энергопотребление. Однако, пьезомеханизмы не могут рассматриваться отдельно от задающей и управляющей электроники. Пьезоактуаторы, такие как пьезоактуаторы с интегрированным рычажным усилителем перемещения АРА (сокращение от «Amplified Piezo Actuators») и параллельно преднагруженные актуаторы РРА (сокращение от «Parallel Pre-stressed Actuators») были разработаны по заказу Французского Космического Агентства (далее «ФКА»). Впервые эти пьезоактуаторы применялись в оптической системе в миссии PHARAO Европейского Космического Агентства (далее «ЕКА») для решения следующих задач:

- точное наведение лазерных лучей,
- подстройка лазерного резонатора.

Также был протестирован прототип механизмов на основе пьезоактуаторов для осуществления фокусировки.

Пьезоактуаторы применяются и в других областях: улучшение разрешения матрицы по технологии микро сканирования с повышенной частотой, как в инструменте SOHO/LASCO; высокоскоростная работа пьезоэлектрических шторок в синхротронах; оптический фильтр, совмещенный с интерферометром Фабри-Перо, как в лидаре для наблюдения за поверхностью Земли. Далее будет подробно описано первое применение технологии микро сканирования и представлен краткий обзор оставшихся областей применения.

Ключевые слова: пьезоэлектрический, актуатор, механизм, космос, оптика.

ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрические актуаторы [1] обладают привлекательными свойствами для космических применений. Они обеспечивают точное позиционирование, не требуют смазки, обладают немагнитными свойствами. Это ведет к малым габаритам механизмов. Однако характеристики пьезоэлектрических механизмов не могут рассматриваться отдельно от их задающей и управляющей электроники. Другие аспекты, которые обычно требуют внимания: механические условия окружающей среды (пьезоактуаторы могут обладать добротностью 100); термомехани-

ческие характеристики и рассмотрение ухудшенных режимов в случае поломки.

Имеется возможность построить пьезоактуаторы с интегрированным рычажным усилителем перемещения АРА и параллельно преднагруженные актуаторы РРА на основе многослойной пьезокерамики, которая была квалифицирована ФКА для космических применений

Эти компоненты могут быть использованы для построения механизмов, работающих с одной или более степенями свободы. Цель этой статьи привести примеры разработок и применений космической оптики.

РАЗРАБОТКА НОРМАЛЬНО ЦЕНТРИРОВАННЫХ МЕХАНИЗМОВ

Компания CEDRAT TECHNOLOGIES за последние несколько лет разработала и квалифицировала ряд нормально центрированных механизмов на основе пьезоактуаторов с интегрированным рычажным усилителем перемещения АРА. Нормально центрированные механизмы в случае отключения питания или в случае поломки позволяют фиксировать полезную нагрузку в центральном положении. Эта особенность помогает при работе в ухудшенном режиме и помогает избежать ситуации, когда при поломке компонента выходит из строя вся система, что часто рассматривается для механизмов.

Сами пьезоактуаторы обеспечивают 90% хода в одном направлении и оставшиеся 10% в другом направлении, поэтому они не являются центрированными механизмами.

Нормально центрированные характеристики достигаются применением пьезоактуаторов в двухтактном режиме (рис. 1).

Пьезоактуаторы с интегрированным рычажным усилителем перемещения впервые были использованы в летном применении в сканирующем механизме (XYZ сборка) для

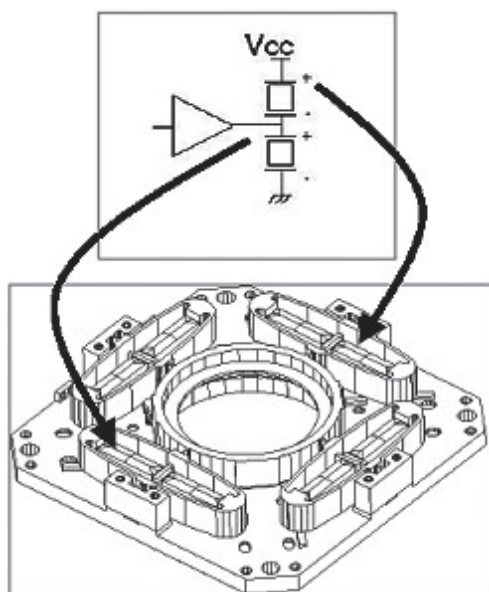


Рисунок 1.

Схема двухтактной конфигурации

ROSETTA/MIDAS [2]. Они были квалифицированы в 2000 году и отправлены в космос в 2004. ROSETTA – первая миссия, программа которой предусматривает не только дистанционное изучение, но и посадку в 2014 году на изучаемую комету Чурюмова-Герасименко. MIDAS (сокращение от «MICRO-IMAGING DUST ANALIS SYSTEM») - атомный силовой микроскоп высокого разрешения для изучения частиц пыли. В 2014 году пьезоактуаторы успешно заработали на комете после 10 лет полета в космосе.

ДВУХОСЕВОЙ МЕХАНИЗМ X-Y

Первый пример нормально центрированного механизма приводится на основании XY сборки, использующей две пары пьезоактуаторов с интегрированным рычажным усилителем перемещения. Так как пьезоактуаторы работают в асимметричном режиме (-20 +150 В), то для получения нормально центрированного механизма требуется симметричная конструкция и управление в двухтактном режиме (рис. 2).

Ключевое достоинство этой разработки в том, что оба канала обеспечивают независимую работу и поэтому позволяют использовать два независимых драйвера и контроллера. Этот аспект значительно упрощает электронику.

Использовались два вида датчиков:

- тензометрические датчики
- емкостные датчики.

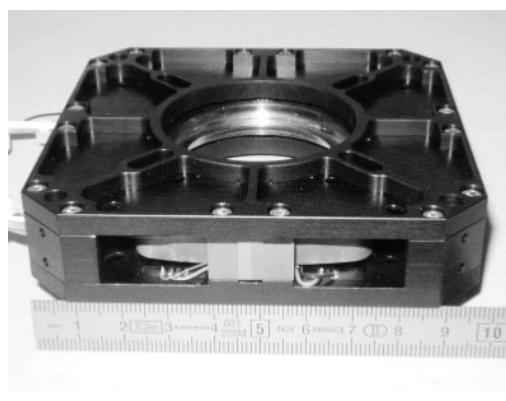


Рисунок 2.

Нормально центрированная XY сборка

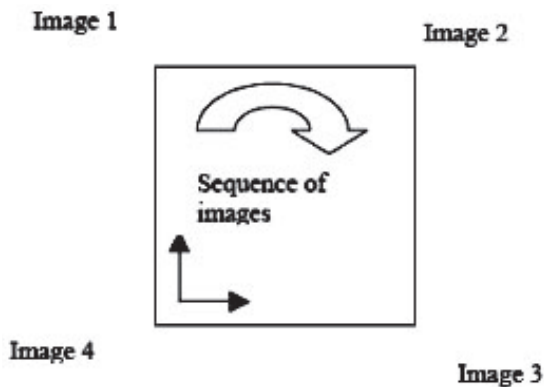


Рисунок 3.
Сканирование с высокой частотой

Одно из стандартных применений такого механизма – это сканирование с высокой частотой. Эта технология используется в космическом телескопе SOHO / LASCO [3] для улучшения разрешения видео детектора. Сборка может перемещать как линзу, так и непосредственно датчик изображения. При работе механизма осуществляются 4 последовательных снимка (рис. 3). Расстояние между 4 точками соответствует половине пикселя.

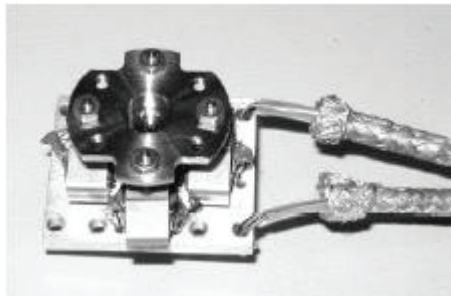


Рисунок 4.
Вид механизма двойного бокового наклона

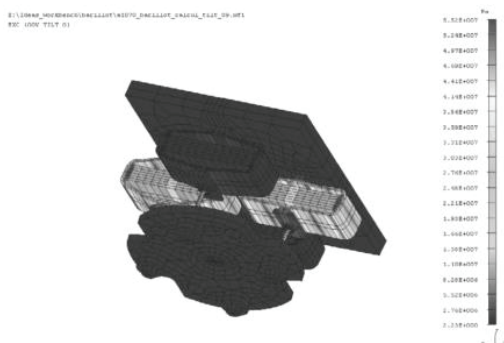


Рисунок 5.
Модель механизма двойного бокового наклона

МЕХАНИЗМЫ БОКОВОГО НАКЛОНА

Для некоторых задач, таких как высокоточное слежение, также требуются высокоточные наклонные механизмы. Впервые такой механизм применялся в космосе для управления мощностью оптического входа в оптическом волокне. В оптической скамье проекта орбитальных цезиевых часов с применением охлаждения атомов PHARAO было использовано 10 механизмов бокового наклона [6].

Для решения этой задачи был разработан миниатюрный механизм двойного бокового наклона. При этом ключевыми характеристиками снова являлись двухтактный режим и два независимых угла наклона (рис. 4). Компания EADS-SODERN впервые применила такой механизм на оптической скамье PHARAO на этой конференции [6].

При уменьшении габаритов механизма требования по вибрации становятся более существенными. Решения на базе пьезо механизмов обычно в 3-5 раз легче, чем решение на базе электромагнитных катушек.

Современные механизмы демонстрируют характеристики: ход +/- 2,8 мрад, ширина полосы 2,8 кГц и угловое разрешение 0,03 мкрад, что находится в пределах требований для лазерной межспутниковой связи.

МЕХАНИЗМ ВРАЩЕНИЯ ВОКРУГ ОСИ Z

Та же методология может быть использована для построения нормально центрированного механизма, осуществляемого только вращением. Этот механизм используется для

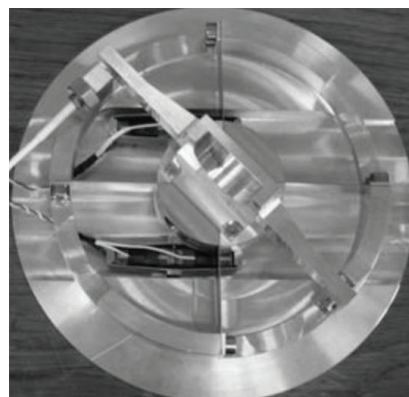


Рисунок 6.
Внешний вид прототипа механизма вращения вокруг оси Z обсерватории Париж-Медон

корректировки вращения борта Глобального Астрометрического Интерферометра для Астрофизики GAIA (сокращение от «Global Astrometric Interferometer for Astrophysics») на видео детекторе инструмента Спектрометра Радиальной Скорости GAIA RVS (сокращение от «Radial Velocity Spectrometer»). Опытный макет этого механизма был произведен в обсерватории Париж-Медон. Этот механизм может использоваться в криогенной среде.

ЗАДАЮЩАЯ И УПРАВЛЯЮЩАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Несмотря на то что пьезоактуаторы имеют неограниченное разрешение, другие характеристики такие как точность и стабильность могут быть улучшены с помощью петли обратной связи, включающей сенсор положения. Таким образом, характеристики становятся зависимыми от управляющей электроники.

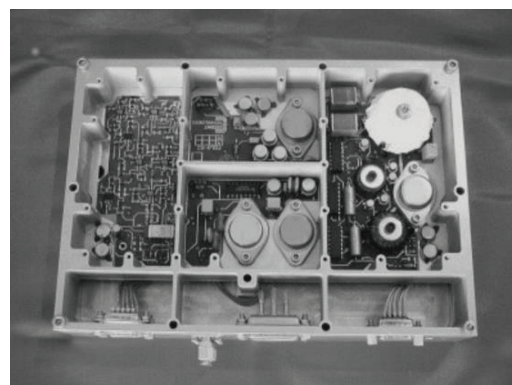


Рисунок 7.
**Внешний вид прототипа задающей
и управляющей электроники**

Электроника управления пьезоактуаторами должна обладать несколькими свойствами:

- высоким отношением сигнал/шум,
- низким током покоя,
- защитой от короткого замыкания.

Электроника FB-LA75-space (рис. 7) включает:

- DC/DC конвертер,
- 2 независимых канала с линейными уси-

Таблица 1.
**Характеристики поворотно-наклонного механизма DTT35XS
и его управляющей электроники**

Параметр	Единицы измерения	Величина
Функциональные характеристики		
Ход	мрад	+/- 2
Стабильность в пределах полосы 1 кГц с применением тензодатчиков	мкрад	1
Точность с петлей обратной связи	%	+/-1
Ширина полосы	Гц	1000
Эксплуатационные характеристики		
Срок службы		10 ⁸ полных ходов
Условия окружающей среды		
Температура хранения	градусы	-50 / 75
Случайные колебания, среднеквадратичное значение	G	41
Ударные нагрузки		200 G Полусинусоидальный импульс длительностью 500 микросекунд
Интерфейсы		
Масса	г	15
Габариты	мм	23×23×16
Управляющая электроника		
Шина первичной цепи	В	18 - 38
Вторичные выходы	В	160, -30, 20, -20
Выходной ток линейного усилителя	мА	+/- 30
Запас по фазе линейного усилителя	градусы	45 минимум
Емкостная нагрузка	мкФ	0,2 до 40
Уровень излучения	кРад	10

лителями АВ, ПИД регулятор, преобразователь сигналов тензометрических датчиков положения

Эта электроника была спроектирована в соответствии с требованиями к космическому уровню исполнения, на основании обнародованного номенклатурного перечня [7]. Свойства электроники были протестированы на воздействие температуры и вакуума. Характеристики приводятся в таблице 1.

КРАТКИЙ ОБЗОР СТАНДАРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Механизм двойного бокового наклона DTT35XS – это пример полностью стандартного нормально центрированного механизма, с возможностью квалификации для космических применений. Характеристики поворотно-наклонного механизма DTT35XS и его управляющей электроники приведены в Таблице 1. Особенно примечательны его весовые характеристики.

МЕХАНИЗМЫ ФОКУСИРОВКИ

Атмосферные лидары (LIDAR) [8], предназначенные для дистанционного зондирования Земли, используют высокоточный источник лазерного излучения, работающий на одной частоте. Пьезомеханизмы фокусировки работают в широком диапазоне частот и используются для предотвращения возможного ухода частоты источника лазерного излучения. Следовательно, параллельно преднагруженные актуаторы, являются хорошо подходящими для этих задач. Преднагрузка является неотъемлемой характеристикой для динамических применений и реализуется с помощью внешней монолитной пружины.

Также нужно отметить, что активные построечные пьезо фильтры также могут быть использованы в приемной цепи: пьезоэлектрические актуаторы могут быть использованы для подстройки длины волны резонатора Фабри-Перо.

Впервые данное решение было применено для построения Лазера с Внешним Резонатором, разработанного компанией EADS SODERN для генератора лазерного излучения PHARAO (рис. 8) [6].

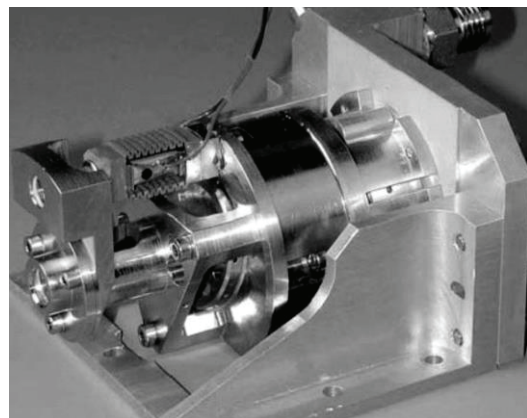


Рисунок 8.
Внешний вид Лазера с Внешним Резонатором, подстраиваемого пьезоактуатором (фото из архива of EADS SODERN)

Второе применение – это механизм фокусировки лазерного генератора на борту первого Европейского лидара LIDAR ALADIN. Задача этого лидара – это измерение скорости ветра. Это применение требует наличие лазера для космических применений, работающего с очень точной частотой.

Для компенсации ухода частоты, генератор лазера фокусируется в динамическом режиме с помощью пьезоактуатора (рис. 9). Это применение является ответственным для пьезоактуатора: оно требует обеспечить работу при воздействии вибрации частотах до 10 кГц и обеспечить срок службы более 10^{10} циклов.

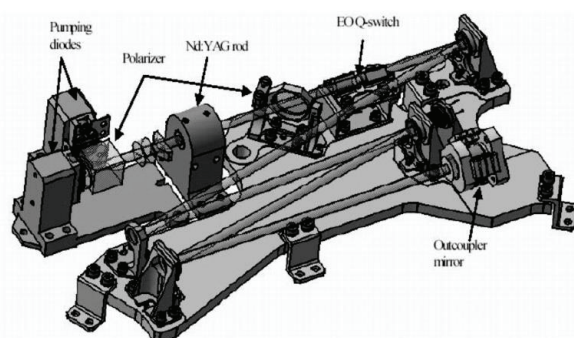


Рисунок 9.
Динамическая фокусировка задающего генератора лазера (фото из архива Gallileo Avionica [9])

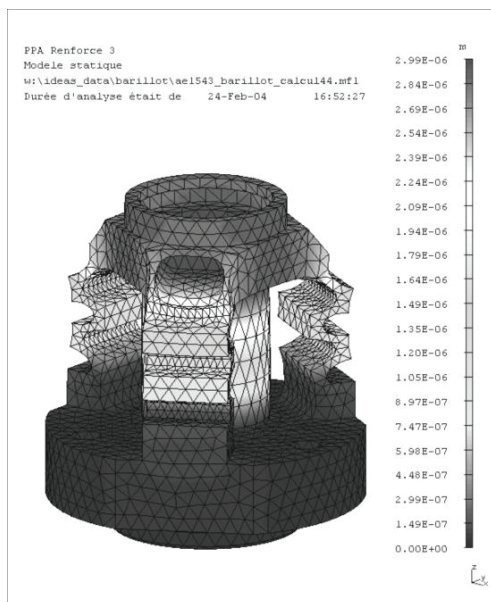


Рисунок 10.

Параллельно преднагруженный пьезо актуатор с полым валом для фокусировки лазерного луча

Специально для этой задачи был разработан параллельно преднагруженный актуатор (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

Пьезомеханизмы все больше и больше применяются для улучшения оптических характеристик. Нормально центрированные пьезоэлектрические механизмы являются инновационными, обладают малым весом и позволяют сохранить центральное положение в режиме ограниченной функциональности.

Компания CEDRAT TECHNOLOGIES разработала новую серию нормально центрированных механизмов для космических применений, которые не требуют никаких дополнительных фиксирующих устройств при выводе на орбиту: XY-сборка и поворотно-наклонные механизмы. Дополнительно были разработаны следующие решения:

- Несколько типов датчиков положения (тензометрические датчики, емкостные датчики)

- Несколько решений для увеличения возможности удерживать большую полезную нагрузку в условиях вывода на орбиту

- Была разработана и протестирована задающая и управляющая электроника

Развивается применение пьезо механизмов в системах фокусировки точных одночастотных лазерных источников, которые используются в ЛИДАРАХ.

Наметившийся тренд – это применение пьезо механизмов в криогенной среде.

Благодарность

Эта работа была выполнена благодаря финансовой поддержке Французского Министерства Развития и Французского Космического Агентства.

Список литературы:

1. C. Niezrecki et al., "Piezoelectric actuation: state of the Art", The Shock and Vibration Digest, vol. 33(4), pp 269-280, 2001.
2. R. Le Letty et al, "The scanning mechanism for Rosetta/Midas : from the engineering to the flight model", pp. 75-81, 9th ESMATS Proc., Liège, 2001.
3. F. Burger, J. Eder, "Soho LASCO", pp 9-14, 6th ESMATS proc., Zurich, 1995.
4. T. Blais, F. DiGesù, "Fine steering mechanism for new generation optical terminals", pp 73 --- 80, 8th ESMATS Proc., Toulouse, 1999.
5. W. Schmidt, "High resolution spectropolarimetry with a large balloon-borne solar telescope", Adv. Space. Research, vol. 29(12), pp. 2055-2060, 2002.
6. F. Pécal et al., "Pharao space atomic clock mechanisms", 10th ESMATS Proc, 2003.
7. O. Sosnicki et al., "Driving and control electronic of piezoelectric actuators for space applications", EPE2003, Toulouse, 2003.
8. R. Flatscher et al., "Laser radar for scientific space applications", ESA bulletin n°101, Feb. 2000.
9. A. Consentino, "High energy, single frequency, tunable, laser source operating in burst mode for space based LIDAR applications", ICSO 2004, SP-554, Toulouse, 2004.

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ С НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ

КАЛИНИН Ю.А.* , КРЕХОВА Е.Ю.** , ПОЗДНЯКОВ А.Е.**

* ОАО «Швабе-Исследования»

**АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: isaychev.00@mail.ru, npk-74@lzos.ru

В статье рассмотрены основные аспекты создания лазерных установок с большим коэффициентом усиления и длительностью импульса излучения 3÷5 нс для контроля лучевой прочности оптических материалов и покрытий. Показано, что вновь созданная установка для контроля лучевой прочности позволяет проводить производственный контроль образцов лазерного фосфатного стекла, использующегося в качестве активной среды лазера.

Ключевые слова: лучевая прочность, импульсное излучение, эквивалентная площадь воздействия, активный элемент.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Одна из основных задач при создании лазерных систем с наносекундной длительностью излучения - повышение их эффективности и надежности работы, которая напрямую зависит от работы отдельных элементов. Причина выхода из строя отдельных оптических элементов лазера (активных элементов зеркал, выходных окон и т.п.) - недостаточно высокая лучевая прочность (стойкость к собственному излучению).

В настоящей работе, вновь созданная лазерная система на основе твердотельного лазера с наносекундной длительностью импульсов излучения используется для контроля лучевой прочности оптических материалов и покрытий, в первую очередь для контроля лазерного фосфатного стекла, используемого в составе мощных лазерных установок в качестве активных элементов.

Лазерная установка построена по стандартной схеме, принятой для установок, действу-

ющих в наносекундном диапазоне длительностей импульса. Особенность разработки – возможность, при использовании генератора малой мощности, усилить энергию излучения (коэффициент усиления не менее 10 000) и сформировать на испытываемом образце эквивалентную зону воздействия с равномерным распределением плотности излучения в пятне с достаточно большими размерами 5x5 мм.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ С НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для определения лучевой прочности любого оптического материала необходимо иметь источник излучения (лазер) средства измерения энергии (мощности) в лазерном пучке и эквивалентную площадь воздействия на испытываемый материал.

Эквивалентная площадь воздействия (S экв.)

– это площадь лазерного пятна с равномерным распределением плотности энергии равной максимальной плотности энергии в реальном пятне и содержащем такую же энергию. Как правило, при Гауссовом распределении S экв. измеряют по уровню 0,5 интенсивности излучения. Эквивалентная площадь воздействия может быть определена из пространственного распределения энергии излучения на испытуемом образце.

Самым простым способом ее определения является способ выжигания поглощающим излучением материалом, например фотобумагой, и последующим измерением диаметра пятна полученного ожога при последовательном ослаблении излучения набором светофильтров до порога образования прогара. Построив соответствующую кривую, можно определить диаметр пятна на уровне 0,5 интенсивности. Более совершенным является способ засветки фотопленки с последующим ее фотометрированием.

Измерители энергии (мощности) излучения могут быть построены на различных физических принципах – калориметрических, фотоэлектрических и др.. Современные приборы для измерения мощности лазеров, могут быть совместимы со всеми типами датчиков: термоэлектрическими, пироэлектрическими и фотодиодными.

Основной принцип построения установок измерения лучевой прочности со второй половины прошлого века практически неизменный и включает следующие основные элементы: задающий генератор, система вырезания импульса на основе затвора Поккельса, несколько каскадов усиления и система пространственных фильтров. Усовершенствования установок измерения лучевой прочности, в основном касались, системы регистрации энергии излучения, формы импульса генерации и регистрации пространственного распределения излучения в фокальном пятне – использовались более точные модели калориметров, фотоприемников и осциллографов, устанавливались ПЗС – камеры. Тем не менее, усовершенствовались методики проведения измерений лучевой

прочности, в которых уделялось внимание, как учету статистического характера процесса разрушения, так и точности оценки и удобству реализации измерений.

В частности, в работе [1] описана методика, позволяющая не только оценить пороговую плотность энергии, но и учесть статистический характер процесса разрушения поверхности. Рис. 1 иллюстрирует вариант методики, учитывающий статистический (вероятностный подход). Учитывая, что закон распределения энергии в пятне облучения и уровень плотности энергии известны ($\varepsilon(r)$ и $\varepsilon(r_m)$ соответственно), считается, что граница по контуру наиболее удаленных точек разрушений соответствует пороговому уровню плотности энергии для данного образца. Круговой контур, показанный в верхней части рис. 1 демонстрирует зону разрушений, определенную по наиболее удаленным точкам.

Позже появилась экспресс методика определения лучевой прочности, заключающаяся в том, что образец облучается не одним пучком, а матрицей пучков с гауссовым распределением интенсивности [2]. Суть методики заключается в том, что исследуемый образец облучается не одним лазерным пучком, а матрицей пучков с гауссовым распределением.

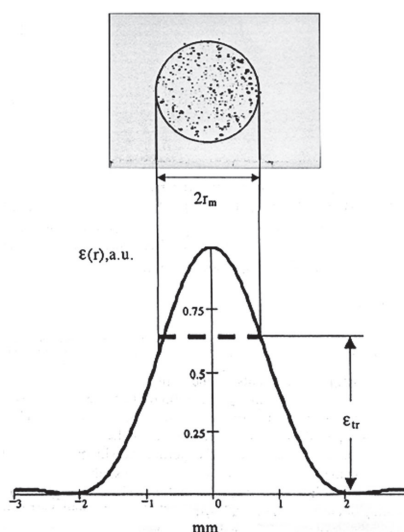


Рисунок 1.

Схематичное изображение метода определения порога образца: сверху – поверхностное повреждение стекла; снизу – распределение плотности энергии в облучающем пятне

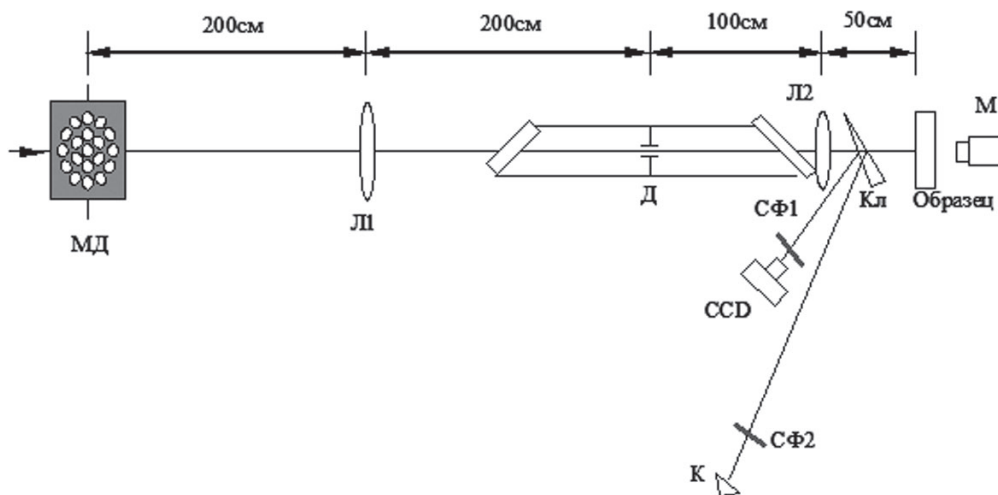


Рисунок 2.

Оптическая схема формирования матрицы гауссовых пучков:
МД – матрица диафрагм; **Л1, Л2** – линзы с фокусными расстояниями **200 см, 50 см**; **Д** – диафрагма диаметром **2 мм**; **Кл** – клин; **СФ1** и **СФ2** – светофильтры; **К** – калориметр; **ССD** – **ССD-камера**; **М** – микроскоп

Оптическая схема по формированию матрицы приведена на рис. 2.

Лазерный пучок дифракционного качества апертурой $\varnothing 24$ мм падает на матрицу диафрагм. Диаметр матрицы 19 мм, диаметр диафрагм 3 мм, количество диафрагм 19. Матрица диафрагм располагается в фокальной плоскости линзы Л1 ($f=200$ см), соответственно изображение матрицы перестраивается на бесконечность. С другой стороны линзы в фокусе располагается диафрагма $\varnothing 2$ мм, осуществляющая угловую селекцию излучения. Диафрагма находится в вакуумной кювете. В 1 метре от селектирующей диафрагмы располагается линза Л2 ($f=50$ см). Так как первая линза перестраивает изображение матрицы диафрагм на бесконечность, то линза Л2 из бесконечности перестраивает изображение в фокальную плоскость. При этом изображение формируется в фокусе в независимости от расстояния между линзами. Сформированное таким образом излучение падает на образец. Диаметр матрицы гауссовых пучков на образце в данной схеме равен ≈ 5 мм, эффективный диаметр пучка составляет 0,5 мм. Типичное распределение интенсивности лазерного излучения на образце приведено на рис. 3.

Данная методика приемлема для определения лучевой прочности в условиях производственного контроля, однако учитывая малый

эффективный диаметр пучка и более низкую вероятность попадания дефектов материала в область действия матрицы пучков излучения по сравнению с площадью единого лазерного пятна аналогичного размера, данный метод предполагает все же проведение многократных испытаний на нескольких образцах для увеличения точности измерения.

Одна из последних оригинальных экспресс-методик, разработанная для определения объемной лучевой прочности прозрачных диэлектриков, а также лучевой прочности оптических поверхностей и их покрытий, позволяет определить статистику оптического пробоя в режиме воздействия одиночным лазерным импульсом на длине волны $\lambda = 1064$ нм с максимальной энергией 2 мДж [3]. Однако, диа-

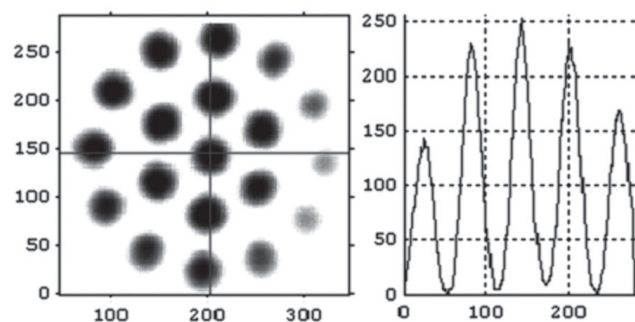


Рисунок 3.

Типичное распределение интенсивности лазерного излучения падающего на образец

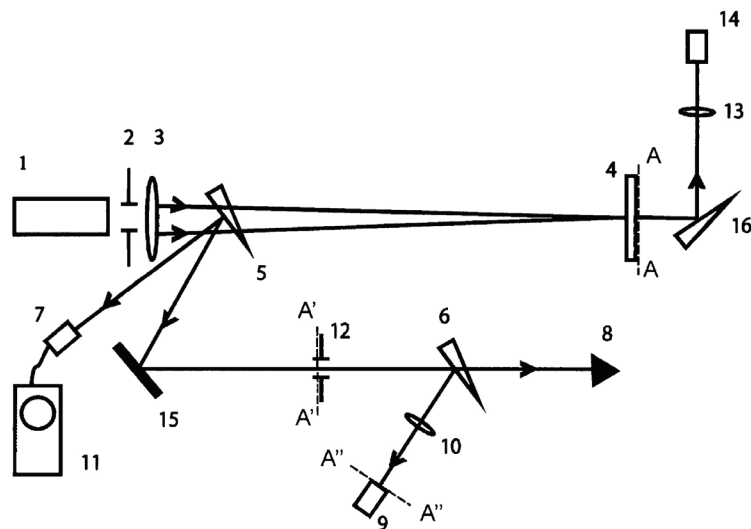


Рисунок 4.

Схема экспериментальной установки для измерения лучевой прочности

метр пятна облучения в вышеописанной работе составил всего 29 мкм.

Таким образом, диаметр пятна облучения образца, в предлагаемых методах исследования лучевой прочности, как правило, не превышает 1÷2 мм. Учитывая, что пороговая интенсивность зависит от размера пятна, что хорошо изучено в более ранних работах [4] формирование небольшого S экв., можно отнести к основному недостатку существующих методов.

В работе [5] предложен метод определения лучевой прочности поверхности оптической детали с достаточной точностью, при котором, определяемое значение лучевой прочности практически неизменно при варьировании площади пятна облучения поверхности. Определенное таким образом значение лучевой прочности задней поверхности плоскопараллельной пластинки из стекла КГСС-0180 для пучка диаметром 0,8 мм составило 15 Дж/см², что практически совпадает со значением лучевой прочности, полученным для пучка диаметром 2,4 мм.

На рис. 4 приведена схема экспериментальной установки для измерения лучевой прочности поверхности оптической детали, где 1 - лазер; 2, 12 - диафрагмы; 3 - линза; 4 - оптическая деталь; 5, 6, 16 - оптические клинья; 7 - фотодиод; 8 - калориметр; 9, 14 - ПЗС-камеры; 10, 13 - объективы; 11 - осцилло-

граф, 15 - зеркало, А-А - плоскость, проходящая через заднюю (по ходу лазерного луча) поверхность оптической детали, А'-А', А''-А'' - плоскости диафрагмы 12 и ПЗС-камеры 9 соответственно, оптически сопряженные с плоскостью А-А.

Однако, как видно из рис. 5 количество импульсов в данном случае огромно, что делает данный метод достаточно неудобным для организации производственного контроля.

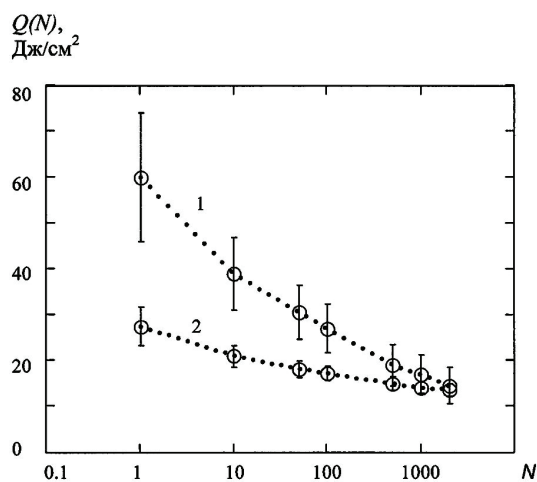


Рисунок 5.

Значения интенсивности лазерного излучения (расчетная величина) $Q(N)$ в зависимости от задаваемого числа количеств облучений N . Для импульсного лазерного излучения длительностью 4.5 ± 0.5 нс по полувысоте с длиной волны 1,06 мкм, формирующих: 1 - пятна облучения диаметром 0,8 мм; 2 - пятна облучения диаметром 2,4 мм

Учитывая, что при организации производственного контроля необходимо обеспечить максимальную точность измерений при минимальном количестве облучений образца, то вопрос увеличения S экв. актуален.

Кроме размера S экв., лучевая прочность образцов стекла также будет возрастать с увеличением длительности воздействующего импульсного излучения. Данный факт хорошо изучен и также должен быть принят во внимание при разработке установок контроля с наносекундной длительностью [6].

Поиски увеличения S экв. также привели к необходимости использованию растровой системы призматического типа для фокусировки излучения. В работе [4] использована растровая система, обеспечивающая однородность накачки излучения и формирование равномерно освещенного пятна достаточной площади (до 120 мм²). В качестве источника излучения использовался неодимовый лазер с длительностью импульса 10^{-7} с и максимальной энергией излучения 200 Дж.

В последние годы вопрос разработки мощных лазеров на неодимовом стекле для исследований управляемого термоядерного синтеза актуализирован и выведен на новый уровень практической реализации. При разработке концепции создания мощной лазерной установки, ВНИИЭФ создан модуль, представляющий собой 4-канальный лазер на неодимовом фосфатном стекле, с полной выходной энергией излучения на длине волны (λ) 1053 нм до 12 кДж при длительности импульса генерации $\tau \approx 3 \div 5$ нс [7]. При этом предполагается, что максимальная лучевая нагрузка на активные элементы 4-х проходного силового усилителя, составит ≈ 10 Дж/см², а запас по прочности должен составлять не менее чем в два раза. Таким образом, активные элементы должны выдерживать плотность собственного излучения как минимум в 20 Дж/см². К тому же, предполагается, что при нагрузке 10 Дж/см² запас прочности обеспечит необходимое для данной системы количество импульсов облучения.

Как выявил обзор существующих установок для измерения лучевой прочности, уста-

новки с вышеуказанными характеристиками, приемлемой для проведения контроля лучевой прочности с достаточной точностью в условиях производства не существует. Поэтому цель настоящей работы – реализовать испытательный стенд для проведения испытаний на лучевую прочность в производственных условиях, прежде всего образцов-свидетелей лазерного фосфатного стекла, используемого в каскадах усилителей мощных лазерных систем.

РЕАЛИЗАЦИЯ СХЕМЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ЛУЧЕВУЮ ПРОЧНОСТЬ С НЕОБХОДИМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Основное оборудование разработанной лазерной установки включает в себя:

- мощный лазерный излучатель;
- оптическую систему формирования лазерного пучка воздействия на образец;
- систему юстировки и наведения лазерного излучения на образец;
- систему измерения параметров лазерного излучения;
- аппаратуру регистрации результатов воздействия лазерного излучения.

Принцип работы лазерной установки состоит в том, что излучение импульса, исходящее от генератора малой мощности, с нужными временными параметрами, последовательно проходит в каскадах усилителей, усиливаясь до нужного значения (10÷15 Дж). После этого, с помощью оптической системы энергия концентрируется на испытуемом образце, обеспечивая плотность на мишени до 60 Дж/см², система измерений фиксирует параметры воздействующего лазерного излучения, затем с помощью микроскопа определяется наличие или отсутствие в данном образце микроразрушений.

Аппаратура лазерной установки расположена в чистых производственных помещениях (класс ИСО 9), в трех отдельных зонах, что обеспечивает необходимые условия проведения измерений и безопасность работы. В первой зоне размещается аппаратура системы энергопитания установки (емкостные накопители, зарядные устройства, блоки



а)



б)

Рисунок 6.

Общий вид лазерной установки (стенда):

а) каскады усилителей; б) система фокусировки излучения

зажигания импульсных ламп накачки). Во второй зоне размещена оптико-механическая часть установки, включающая в себя: задающий генератор, квантроны усилителей, вакуумный пространственный фильтр, измерительную аппаратуру, испытуемые образцы материалов, а так же системы охлаждения и вакуумный насос. В третьей зоне располагается пульт управления установкой. Общий вид установки представлен на рис. 6.

В качестве задающего генератора используется твердотельный лазер на LiYF_4 -кристалле (тетрафторид иттрия-лития) с диодной накачкой, который обеспечивает генерацию импульсов длительностью $3 \div 5$ нс и энергией около 10-3 Дж в одном импульсе. В качестве активной среды в усилительных каскадах используется фосфатное стекло легированное ионами неодима, у которого спектр люминесценции практически совпадает со спектральными характеристиками излучения LiYF_4 -кристалла. В усилительных каскадах используется ламповая накачка.

Технические проблемы, возникающие при построении лазерного усилителя с большими коэффициентами усиления, а именно, устранение воздействия обратного блика на оптику задающего генератора, подавление самовозбуждения в усилителях, решены посредством включения в схему лазерной установки невзаимных элементов: ячейки Фара-

дея на основе кристалла TGG (тербий галлий гранат) и пассивного светозатвора на основе YAG: Cr^{4+} (кристалл иттрий алюминиевого граната, легированный хромом). С помощью фазовой пластинки $\lambda/4$ в каскадах усилителей реализуется круговая поляризация излучения, вакуумный пространственный фильтр устраняет мелкомасштабные неоднородности и настроен на получение расходящегося излучения. Совокупность этих схемотехнических решений позволила повысить пороги самофокусировки излучения в активных элементах усилительного тракта установки.

Фокусировка лазерного излучения с помощью призмного раstra и положительной линзы позволяет сформировать на испытываемом образце зону воздействия с равномерным распределением плотности излучения в пятне с размерами около 5x5 мм (см. рис. 7а). Призмный растр играет роль гомогенизатора лазерного пучка и состоит из 49-и растровых элементов, образованных 7-ю гранями с каждой стороны элемента из стекла К-8 (см. рис. 7б).

Система измерения энергетических параметров излучения включает в себя тепловые головки (тепловой датчик средней мощности, термоэлектрический датчик) производства Ophir и регистрирующий прибор Nova II, обеспечивающие измерение энергии импульсов излучения с погрешностью $\pm 3\%$.

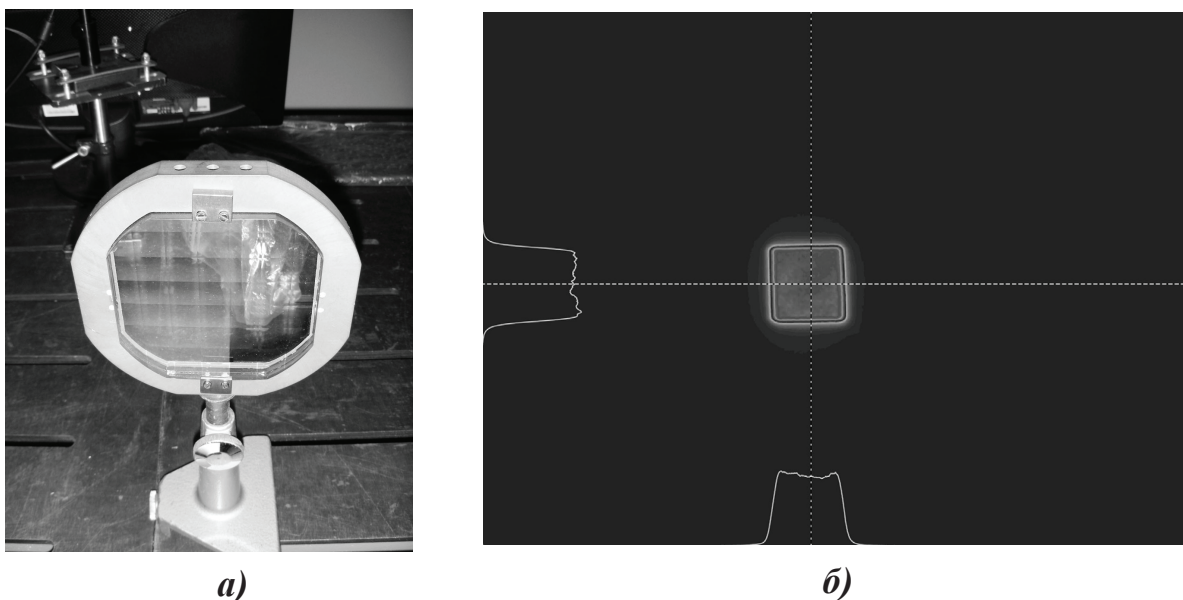


Рисунок 7.

Внешний вид призмного раstra (а), обеспечивающего формирование прямоугольного профиля сфокусированного пучка излучения с размерами около 5х5 мм с равномерным распределением плотности излучения в пятне (б)

Для измерения временных параметров излучения использован кремниевый фотодиод FPS-1 с осциллографом, что позволяет регистрировать импульс длительностью 3÷5 нс.

Реализованная конструкция лазерной установки обеспечивает устойчивые характеристики лазерного излучения, приведенные в табл. 1.

Безопасность работы на лазерной установке достигается рядом принятых мер.

Во-первых, как уже говорилось выше, расположением основного оборудования в разных зонах: система электропитания оборудования и пульта управления системой

электропитания отделены от основного зала. При этом, передача информации на пульт управления о напряжении на каждой из емкостных батарей осуществляется с помощью видеокамеры.

Во-вторых, лабораторное помещение снабжено устройствами блокировки, которые обеспечивают снятие высоковольтного заряда с конденсаторов при открывании входной двери лабораторного помещения.

С точки зрения методических возможностей проведения измерений на данной установке не исчерпывается прямыми измерениями размера пятна и энергетических

Таблица 1.
Параметры лазерной установки

Длина волны излучения	1054 нм
Длительность импульса излучения	3÷5 нс
Выходная энергия излучения в импульсе	10÷20 Дж
Распределение плотности излучения (степень неоднородности распределения в пятне)	±10%
Плотность излучения на мишени	3÷60 Дж/см ²
Режим работы	один импульс в 10 минут
Размер пятна воздействия на испытуемом образце, мм	не менее 5 x 5 мм

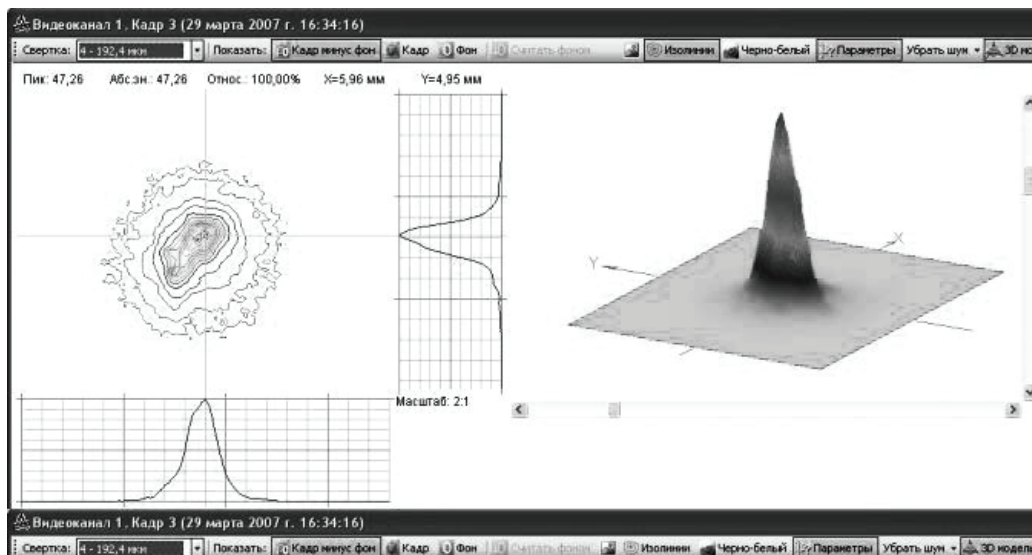


Рисунок 8.

Карта изолиний и визуализация распределения плотности излучения

параметров. Также возможно, проводить определение пороговых значений плотности энергии излучения, приводящих к разрушениям в образце посредством наложения топографической картины разрушений на распределения плотности энергии в пятне воздействия. Данная задача решается при помощи программы IsoMap, которая позволяет проводить обработки числовых массивов файлового формата CSV, генерируемых программным обеспечением видеочамеры, и проводить визуальный анализ распределений плотности излучения по CSV файлам и определять карту уровней одинаковой плотности энергии (см. рис. 8).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе измерений были реализованы следующие величины параметров излучения:

- длительность импульса $3 \div 5$ нс;

- величина выходной энергии от 3 до 15 Дж, что достигается изменением уровня напряжения на емкостных накопителях (устанавливается в пределах от 0 до 5000 В с точностью 10 В);

- плотность энергии излучения в районе исследуемого образца – от 3 до 60 Дж/см² (в зависимости от размера пятна), реализуется ослаблением излучения с помощью набора нейтральных светофильтров.

Измеренная пороговая плотность энергии (лучевая прочность) образцов-свидетелей дисковых активных элементов из фосфатного стекла удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям, погрешность измерений составила $\pm 8\%$ при количестве облучений образца 8-10 раз. В табл. 2 приведены экспериментальные значения объемной лучевой прочности образцов лазерного фосфатного

Таблица 2.

Зависимость значений лучевой прочности образцов лазерного фосфатного стекла от технологического процесса

Технология	Объемная лучевая прочность, Дж/см ²
Техпроцесс №1	11
Техпроцесс №2	20
Техпроцесс №3	34

стекла одинакового состава, но полученных с использованием различных технологических процессов. Полученные данные позволили оценить направления усовершенствования технологии производства фосфатного стекла с точки зрения лучевой прочности.

Опыт эксплуатации вновь созданной лазерной установки показал, что она может быть использована для контроля лучевой прочности широкого класса оптических материалов и покрытий. Кроме того, возможность получения достаточно высокой плотности энергии при относительно большом пятне воздействия позволяет определять в данных условиях порог самофокусировки оптических материалов.

Список литературы:

1. Алексеев В.П., Бессараб А.В., Гаранин С.Г., Дмитриев Д.И., Иванова И.В., и др. Исследование лучевой прочности поверхности экспериментального лазерного стекла. Оптический журнал, 2002. Т. 69, №1, С. 11-15.

2. Бабаянц Г.И., Гаранин С.Г., Жупанов В.Г., Клюев Е.В., Савкин А.В., Сухарев С.А., Шаров О.А. Разработка и исследование диэлектрических покрытий с высокой лучевой прочностью // Квант. Электрон., 2005, том 35. Номер 7, 663-666.

3. Гагарский С.В., Ермолаев В.С., Сергеев А.Н.,

Лузык М.В. Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность. // Изв. Вузов. Приборостроение-2012-Т.55, №7 – Стр. 80-85.

4. Бессараб А.В., Кормер С.Б., Павлов Д.В., Фунтиков А.И. Лучевая прочность некоторых оптических материалов при больших размерах пятна воздействия Квантовая электроника-1977-Т.4, №2-С.436-438.

5. Пат. 2430352 Российской Федерации, МПК G01N17/00 Способ определения лучевой прочности поверхности оптической детали / Дмитриев Д.И. и др.; патентообладатель ФГУП Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем (ФГУП НИИКИ ОЭП)-№ 2010104074/28; заявл. 28.01.2010; опубл.-27.09.2011.

6. Иванов В.В., Михайлов Ю.А., Осетров В.П., Попов А.И., Склизов Г.В. Поверхностная лучевая прочность оптических и лазерных стекол для пикосекундных импульсов // Квант. Электроника – 1995-Т.22-№6 С.589-592.

7. Гаранин С.Г., Воронич И.Н., Зарецкий А.И., Ерошенко В.А., Львов Л.В., Сенник А.В. Канал мощной установки «Луч» для ЛТС с энергией импульса 3,3 КДж // Труды VIII Забабахинских научных чтений, г. Снежинск 5-9 сентября 2005 г. Изд. РФЯЦ - ВНИИТФ, -2005 г.

ОСОБЕННОСТИ ЮСТИРОВКИ ВНЕОСЕВОГО ТЕЛЕСКОПА ТИПА МЕРСЕННА

ПОНИН О.В. , СЕЛИВЕРСТОВА Ю.О., ШАРОВ А.А.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: ponin@lzos.ru, otd22@lzos.ru

Описаны особенности юстировки внеосевых телескопов типа Мерсенна. Рассматриваются юстировка системы в вариантах телескопической и квазителескопической систем. Приведены варианты схем контроля параметров телескопа, обеспечиваемых в процессе сборки и юстировки.

Ключевые слова: телескоп, внеосевая система, юстировка, абберация.

Внеосевые оптические системы (брахиты) сочетают в себе такие преимущества зеркальных систем, как компактность, широкий спектральный диапазон работы, малые оптические потери и др., с отсутствием центрального экранирования, что делает их привлекательными для создания устройств, предназначенных для коллимации излучения. Подобное устройство со схемотехнической точки зрения может представлять собой телескопическую или квазителескопическую оптическую систему [1]. Классическим вариантом зеркальной телескопической системы, свободной от всех аббераций (кроме дисторсии), является телескоп Мерсенна, состоящий из двух параболоидов (как правило, вогнутого и выпуклого) с общим фокусом. Вогнутый параболоид имеет больший световой диаметр, поэтому далее мы будем именовать его большим зеркалом, а выпуклый, соответственно, малым. Стандартная задача юстировки такой системы сводится к совмещению осей параболоидов и к совмещению их фокусов (для телескопической системы), либо к обеспечению заданного расстояния между фокусами (для квазителескопической системы).

Для удобства рассмотрения и анализа погрешностей разъюстировки системы можно

ввести входную и выходную опорные плоскости, перпендикулярные оси симметрии зеркальных параболоидов, расположив их в вершинах параболоидов. Пересекающий опорную поверхность луч определяется двумя линейными прямоугольными координатами (x, y) – проекциями точки пересечения на меридиональную и сагиттальную плоскости, и двумя угловыми координатами – тангенсами углов (φ, ψ) наклона луча в меридиональной и сагиттальной плоскостях. Тогда оптическая система осуществляет преобразование единичного вектора \vec{r} , совпадающего с направлением луча, из входной опорной плоскости в выходную:

$$\vec{r}_1(x_1, y_1, \varphi_1, \psi_1) \rightarrow \vec{r}_2(x_2, y_2, \varphi_2, \psi_2) \quad (1)$$

Таким образом, для решения поставленной юстировочной задачи достаточно иметь следующие подвижки на одном из зеркал: две угловых и две линейных поперёк оси. Кроме того, необходимо обеспечить регулировку промежутка между зеркалами.

Тем не менее, достаточно часто возникает дополнительная необходимость обеспечения заданного положения общей оси симметрии зеркальных параболоидов относительно оси механической конструкции (корпуса) изде-

лия, что, соответственно, должно быть обеспечено двумя дополнительными угловыми подвижками и двумя линейными. Мы рассмотрим случай, когда эти дополнительные подвижки организованы на втором зеркале, то есть структура подвижек обоих зеркал одинакова.

В этом случае предлагается следующая последовательность действий, которая укрупнённо состоит из трёх основных этапов:

1. Выставление оси симметрии большого зеркала в заданное положение относительно оси механической конструкции.

2. Совмещение оси симметрии малого зеркала с осью большого зеркала.

3. Обеспечение заданного промежутка между зеркалами.

Рассмотрим операции, выполняемые на первом этапе.

Чтобы «визуализировать» ось механической конструкции системы на её базовые поверхности устанавливаются юстировочные марки (перекрестия). Ось, проходящая через эти перекрестия, может быть выставлена на ось коллиматора, например, при помощи прибора проверки соосности типа ППС-11 так, как это показано на рис. 1.

Дальнейшее выставление большого зеркала относительно оси корпуса основано на оптических свойствах параболической поверхности. Как известно, параболическое зеркало во внеосевой точке имеет кому и астигматизм (на малых углах преобладает кома) [2]. По величине и направлению этих aberrаций

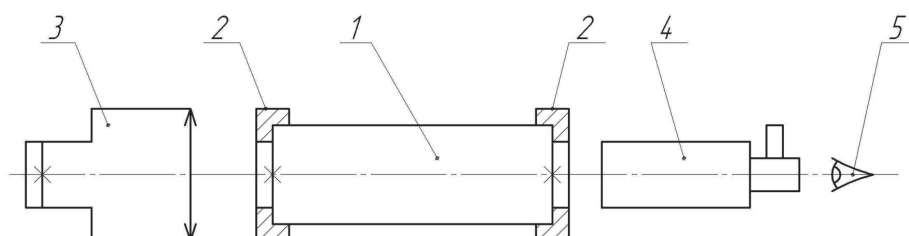


Рисунок 1.

Схема выставление оси механической конструкции системы на ось коллиматора:

**1 – корпус изделия; 2 – юстировочные марки с перекрестиями;
3 – коллиматор; 4 – прибор ППС-11; 5 – оператор**

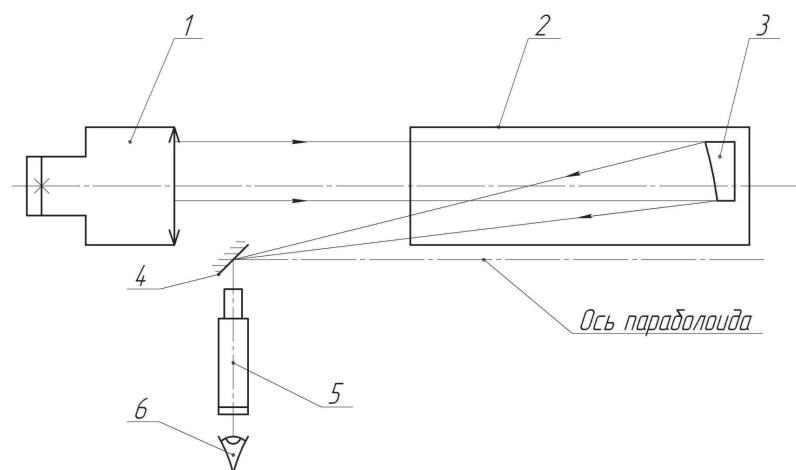


Рисунок 2.

Схема выставления большого зеркала относительно оси корпуса:

**1 – коллиматор с точечным тест-объектом; 2 – корпус изделия;
3 – большое зеркало; 4 – вспомогательное плоское зеркало,
обеспечивающее удобство наблюдения; 5 – микроскоп; 6 – оператор**

можно судить о величине и направлении смещения точки наблюдения с оси зеркала. Если в геометрическое место фокуса параболоида (в привязке к механической конструкции) поместить осевую точку поля предметов микроскопа, как это показано на рис. 2, то можно наблюдать изображение точечного тест-объекта коллиматора (рис. 3) и, соответственно, по качеству его изображения регулировать положение большого зеркала.

Подход, основанный на оценке качества изображения, использованный при юстировке большого (вогнутого) зеркала, применим и на этапе выставления малого (выпуклого) зеркала с той лишь разницей, что наблюдение приходится вести в «обратном» ходе, так

как на зеркало направляется идеальный сходящийся пучок, а оценивать необходимо искажение параллельного пучка лучей. С этой целью после малого зеркала устанавливается вспомогательный эталонный объектив, ось которого предварительно (до установки малого зеркала) должна быть выставлена параллельно оси коллиматора. Детально схема выставления малого зеркала показана на рис. 4.

Последняя схема применима также для проверки правильности выставления расстояния между большим и малым зеркалом вдоль оси, которое осуществляется путём проверки сходимости пучка лучей после малого зеркала. Для этого система «вспомогательный объектив-микроскоп» должна быть предва-

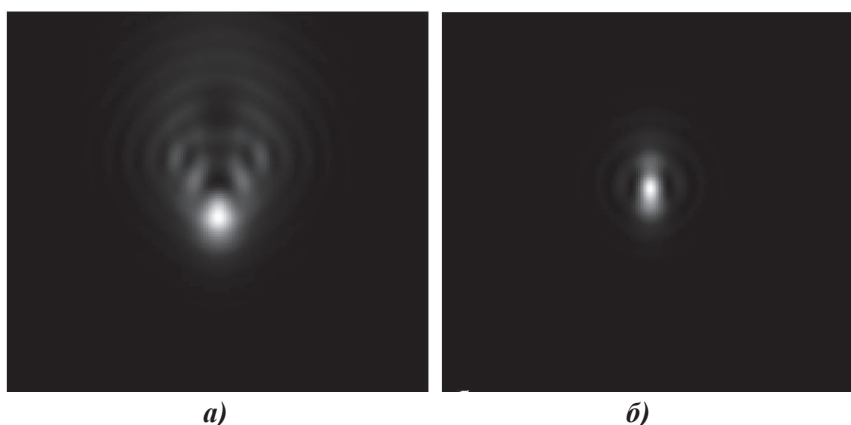


Рисунок 3.

Изображение точечного тест-объекта:

а) – наклон большого зеркала 2 градуса; б) – наклон большого зеркала 0,5 градуса

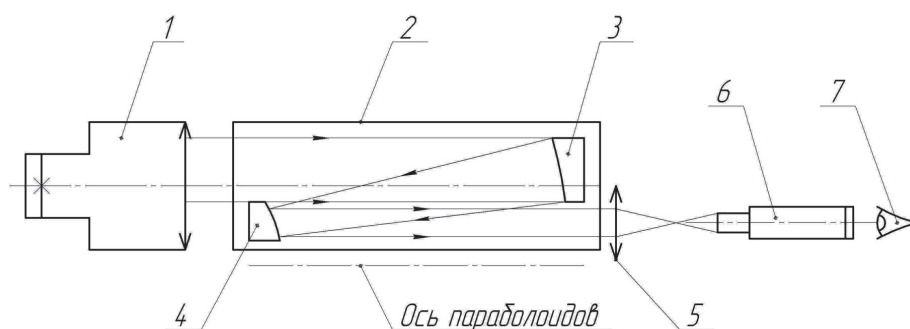


Рисунок 4.

Схема выставления малого зеркала:

*1 – коллиматор с точечным тест-объектом; 2 – корпус изделия;
3 – большое зеркало; 4 – малое зеркало; 5 – вспомогательный объектив;
6 – микроскоп; 7 – оператор*

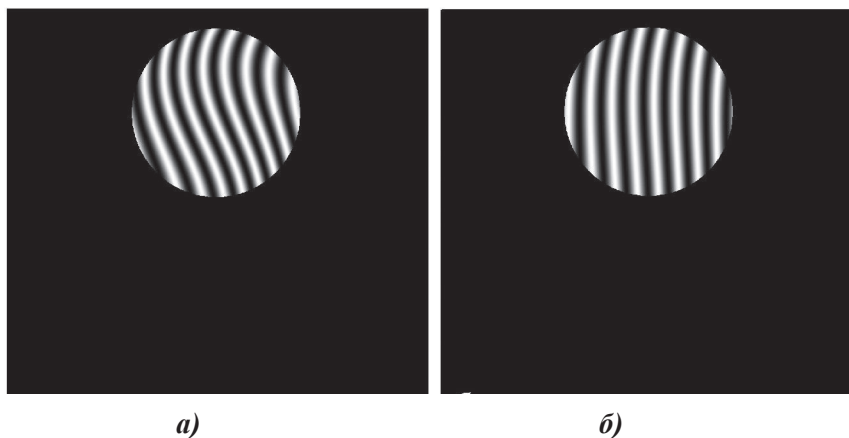


Рисунок 5.

Интерференционная картина:

а) – наклон большого зеркала 2 градуса; б) – наклон большого зеркала 0,5 градуса

рительно выставлена «на бесконечность» по коллиматору, а микроскоп снабжён устройством отсчёта продольного перемещения.

К описанному выше подходу могут быть применены строгие количественные критерии, если распределение энергии в изображении точки зарегистрировать ПЗС-видеокамерой и обработать, выделив кому.

Другая возможность количественно оценить aberrации, вносимые разъюстировкой,

заключается в применении средств интерферометрического контроля. Влияние наклона зеркала на интерференционную картину приведено на рис. 5.

Список литературы:

1. Климков Ю.М. Основы расчета оптико-электронных приборов с лазерами.- М.: Сов. радио, 1978.-264 с.
2. Максудов Д.Д. Астрономическая оптика. – Л.: Наука, 1979. – 395 с.

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

ГОРЕЛИК Б.Д., РЫЧКОВ А.С.

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

E-mail: infeir@gmail.com

В статье приведены результаты экспериментальных работ, выполненных на Красногорском заводе при внедрении инструмента из синтетических алмазов и разработке технологий производства сверхгладких поверхностей оптических деталей силовой оптики.

Ключевые слова: микрорельеф поверхности, структура поверхностного слоя оптической детали.

В 70-х годах прошлого века в институте сверхвысоких давлений АН СССР была разработана технология получения синтетических алмазных порошков. Министерство поручило Красногорскому механическому заводу разработку конструкций инструмента из синтетических алмазов и технологических процессов их применения в оптической отрасли.

Для внедрения технологий алмазной обработки оптики нужно было установить следующие параметры технологических процессов:

1. Режимы работы инструмента.
2. Влияние режимов обработки на микрорельеф обработанной поверхности.
3. Влияние режимов обработки, свойств обрабатываемого материала, параметров инструмента на структуру обработанной поверхности.

Конечным результатом обработки поверхностей оптических деталей является микрорельеф и структура поверхности.

Исследования микрорельефа и структуры поверхности проводились в ГОИ им. С.И.

Вавилова и представлены в работах [1], [2], [3]. Исследование поверхностей оптических деталей, обработанных синтетическими алмазами, представлены в работах института свехтвердых материалов (Укр. НИИСМ) [4], [5].

Актуальность проблемы вытекает из тенденции современного развития оптического приборостроения. Оптическое приборостроение развивается в следующих основных направлениях:

1. Освоение новых оптических диапазонов.
2. Повышение качества выходных параметров традиционных оптических систем.
3. Повышение информативности оптических систем.
4. Широкое применение мощных квантовых генераторов в оптических системах (силовая оптика).

ОСВОЕНИЕ НОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДИАПАЗОНОВ

В настоящее время освоенными считаются следующие спектральные диапазоны:

1. Видимый диапазон (340-640) нм. Уровень освоения 60-70 гг. прошлого века.

2. Ближний ИК диапазон (680-1100) мкм.
Уровень освоения 70-80 гг. прошлого века.

3. Инфракрасный (тепловой) диапазон:

- ближний (2-6) мкм;

- дальний (8-14) мкм.

Уровень освоения 1980-2000 гг. прошлого века.

На первый план вышел вопрос ультра-фиолетового диапазона (УФ-диапазон) 200 – 340 нм.

Освоение УФ-диапазона связано с разработкой новых оптических сред, метрологии технологической и аттестационной, разработкой технологий получения сверхгладких поверхностей оптических деталей (СГП).

Необходимость применения СГП для деталей УФ-диапазона вытекает из того, что длина волны УФ-диапазона 200 - 250 нм в 2 - 2.5 раза меньше длины волны видимого диапазона (500 нм). Поэтому, чтобы получить тот же уровень рассеяния энергии, какой достигнут сегодня в видимом диапазоне, для УФ-диапазона необходимо снизить количество дефектов поверхности, вызывающих рассеяние энергии.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРАДИЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

На каждой поверхности оптической детали системы происходит рассеяние энергии, зависящее от дефектов поверхности и качества ее обработки.

Поскольку поверхностей в оптической системе много, то и потери энергии значительны.

Пропускание энергии через поверхность определяется по формуле:

$$\tau = 1 - \rho \quad (1)$$

где

τ - пропускание,

ρ - потери на рассеяния.

Поскольку поверхностей в оптической системе много и каждая поверхность рассеивает энергию в зависимости от качества обработки, то суммарные потери энергии на рассеивание (шумы) могут достигать значительной величины, что приводит к снижению разрешения и информативности системы.

Это не позволяет фиксировать слабые сигналы на большом энергетическом фоне. Поэтому для повышения качества оптических систем желательно снизить уровень рассеяния энергии на поверхностях оптических деталей, то есть использовать сверхгладкие, (малошумящие) поверхности.

ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Широкое применение в оптических системах различного рода приемников сигналов и методов обработки информации позволили резко повысить качество и информативность оптических систем. Однако качество электронной обработки информации в значительной мере зависит от соотношения сигнал-шум. Чем меньше уровень шумов в системе, тем выше разрешение сигнала. В связи с этим так же встает вопрос о снижении шумов на поверхностях оптических деталей.

СИЛОВАЯ ОПТИКА

В оптических системах с применением квантовых генераторов большой мощности, основной проблемой является рассеяние и поглощение энергии в поверхностном слое оптических деталей.

Рассеяние и поглощение энергии в поверхностном слое оптической детали зависит от качества самой поверхности, наличия адсорбированной влаги, наличия органических и минеральных загрязнений, что приводит к прожигу и разрушению оптической детали. Поэтому для силовой оптики получение сверхгладких поверхностей является доминирующим требованием.

СТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Для получения сверхгладких поверхностей необходимо знать, как эти поверхности формируются и что из себя представляют.

Любая поверхность – это граница раздела двух сред. Четкой границы перехода одной среды в другую не бывает. Между средами существует переходный слой. Этот слой имеет физическую, химическую и механическую природу.

Толщина (протяженность) слоя зависит от методов его получения (формообразования) и конкретна в каждом отдельном случае.

Применительно к поверхностному слою оптического стекла, обработанного в водной среде, она состоит из следующих частей:

- рельефный слой – это микронеровности на поверхности, полученные в результате механической обработки;

- дефектный слой – это система микротрещин в монолите стекла, расположенных под рельефным слоем;

- пленка хемосорбированной влаги;

- адсорбированная и капиллярная влага;

- органические и минеральные загрязнения.

Рассмотрим каждый из этих частей переходного слоя отдельно.

РЕЛЬЕФНЫЙ И ДЕФЕКТНЫЙ СЛОЙ

Вопросы образования микрорельефа поверхности стекла, обработанного свободным абразивом и вопросы теории работы свободного и связанного абразива достаточно полно исследованы в начале и середине прошлого века применительно к грубой и средней шлифовке поверхностей оптических деталей.

Основные выводы по выполненным исследованиям :

Микронеровности поверхности имеют коническую форму. Угол при вершине конуса зависит от марки стекла и составляет 104° - 163° .

Соотношение глубин дефектного и рельефного слоев для марок абразива остается постоянным

$$\frac{F}{h} = k = 4 \quad (2)$$

Где F - глубина дефектного слоя,

h - глубина рельефного слоя.

Из числа факторов влияющих на глубину выколк рельефного слоя, особенно большое значение имеют величина зерна и его твердость, а меньшее – твердость материала шлифовальника. Повышение твердости материала инструмента вызывает увеличение глубины шероховатости, но имеет предел (200 кг/мм^2) после которого выколки имеют

постоянную глубину, что объясняется пределом прочности зерен абразива. На глубину дефектного слоя большое влияние оказывают также физико-механические свойства стекла.

Современные представления о работе закрепленного абразивного зерна при обработке стекла состоят в следующем:

1. Удаление стекла происходит путем «процарапывания» канавок на обрабатываемой поверхности закрепленными зернами абразива. Угол профиля царапин лежит в пределах 155° . Угол профиля зависит от формы абразивного зерна. Ширина H царапины больше диаметра абразивного зерна. Глубина царапины h составляет $0.1 \cdot H$. Глубина дефектного слоя лежит в пределах $(15 - 20) \cdot h$.

2. При перемещении закрепленного абразивного зерна по поверхности стекла микротрещины распространяются не только вперед и вглубь материала, но и в поперечном направлении. Проникающая в трещины влага создает большую концентрацию растягивающих напряжений в стекле.

3. При царапании стекла абразивное зерно движется толчками и испытывает, резко изменяющуюся нагрузку, благодаря чему царапины имеют периодическую структуру. Острая грань зерна вдавливаются в стекло и разрушает его до тех пор, пока не наступает равновесие между силами давления на зерно и реакцией стекла, при которой зерно останавливается. Прерывистое движение зерна сопровождается характерным звуком, подтверждающим наличие вибраций и периодичность его движения.

4. Микрорельеф обработанной поверхности стекла получается при пересечении царапин. Чем чаще будут расположены царапины, тем меньше будут между ними расстояния, тем тоньше будет микрорельеф.

5. При трении алмазного зерна по стеклу в зоне контакта развиваются высокие температуры, соответствующие температуре обугливания алмаза ($1100 - 1200$) $^\circ \text{C}$. При такой температуре стекло находится в пластическом состоянии, поэтому возможно образование микротрещин.

Во второй половине XX века на Красногорском заводе им С.А. Зверева были выполнены исследования микрорельефа и структуры поверхности оптических деталей, обработанных свободными и связанными микропорошками (в том числе из синтетических алмазов). Исследования выполнялись по плану внедрения синтетических алмазных микропорошков на операциях тонкого шлифования оптических деталей.

Основным параметром, определяющим микрорельеф поверхности, является среднеарифметическое отклонение профиля микронеровности Ra , так как этот параметр позволяет грамотно спроектировать построение технологического процесса обработки по переходам и величине припусков на обработку.

В процессе выполнения исследования определялась величина Ra в зависимости от параметров и режимов обработки:

1. Диаметр зерна абразива $D = (10 - 28)$ мкм

$$Ra = C_1 \cdot D^{0.8} \quad (3)$$

где Ra - среднеарифметическая высота микронеровности,

D - диаметр зерна в мкм,

C_1 - технологический коэффициент.

Влияние твердости материала инструмента на высоту микронеровностей.

$$Ra = C_2 \cdot HB^{0.27} \quad (4)$$

где HB - твердость инструмента по Бринелю.

3. Влияние твердости стекла по сошлифовыванию на высоту микронеровностей.

$$Ra = C_3 \cdot q^{-0.23} \quad (5)$$

где q - твердость по сошлифовыванию

$$q = 0.5 \quad H_B = 290$$

$$q = 1 \quad H_B = 450$$

$$q = 1.6 \quad H_B = 600$$

где H_B - твердость стекла по Виккерсу.

4. Влияние скорости обработки на высоту микронеровностей.

Относительная скорость обработки выбиралась по реальным режимам станка типа ШП в пределах $(0.2 - 0.6)$ м/сек

$$Ra = C_4 \cdot V^{-0.5} \quad (6)$$

V - скорость обработки в м/сек,

C_4 - технологический коэффициент.

5. Влияние концентрации алмаза в инструменте на высоту микронеровностей. Концентрация алмаза в инструменте использовалась от 25% до 150%. При 100% концентрация равна 25% объема алмазных зерен в объеме алмазоносного слоя.

$$Ra = C_5 \cdot K^{0.1} \quad (7)$$

где K - концентрация алмаза в инструменте.

6. Влияние удельного осевого давления на высоту микронеровностей. В процессе эксперимента удельное осевое давление менялось ступенчато в интервале от 0.05 кг/см² до 0.250 кг/см²

$$Ra = C_6 \cdot P^{0.04} \quad (8)$$

где P - удельное осевое давление.

Таким образом, наибольшее влияние на высоту микронеровностей оказывают диаметр зерна абразива, твердость стекла и скорость обработки.

Экспериментальная проверка правильности теоретических выводов для формирования микрорельефа поверхности стекла свободными и связанными микропорошками была выполнена на Красногорском заводе им. С.А.Зверева.

В результате работы получены эмпирические зависимости

$$Ra = 0.057 \cdot D^{0.8} \cdot K^{0.1} \cdot HB^{0.25} \cdot q^{-0.23} \cdot P^{0.04} \cdot V^{-0.51} \quad (9)$$

$$H_{\text{деф}} = 0.35 \cdot D^{0.8} \cdot K^{0.1} \cdot HB^{0.25} \cdot q^{-0.23} \cdot P^{0.04} \cdot V^{-0.51} \quad (10)$$

где D - диаметр зерна абразива, мкм

K - концентрация зерен, %;

HB - твердость инструмента, кг/см²;

q - абразивная твердость стекла, относительные единицы;

P - осевое давление, кг/см²;

V - скорость обработки, м/сек;

Полученные формулы соответствуют зависимостям, полученным при физическом моделировании процесса с достаточно высокой точностью (в пределах 5-10%).

Это говорит о том, что при обработке стекла микропорошками физика процесса не меняется.

Соотношение дефектного и рельефного слоев $K = \frac{H_{оэф}}{Rz}$ – для связанных алмазных микропорошков отличается стабильностью при изменении твердости связки и увеличивается при уменьшении фракций абразива. Значения коэффициента K изменяется для случаев обработки алмазными микропорошками в пределах 5-6 (для свободного абразива $K = 4$).

Особый интерес представляет изменение угла при вершинах микронеровностей.

На рис. 1 показано изменение угла при вершине микронеровностей в зависимости от следующих факторов:

1. Для свободного абразива при изменении диаметра зерна при обработке одной марки стекла угол профиля постоянен.

2. Для связанного абразива при обработке стекол разных марок абразивом одного диаметра угол профиля постоянен.

3. Для связанного абразива при обработке стекол разных марок разным по зернистости

абразивом угол профиля увеличивается с уменьшением зернистости абразива.

4. С уменьшением высоты микронеровностей угол при вершине увеличивается и меняется в пределах $168^\circ - 175^\circ$.

Методика и метрология выполненных на Красногорском заводе им. С.А.Зверева исследований подробно изложена в работе [6].

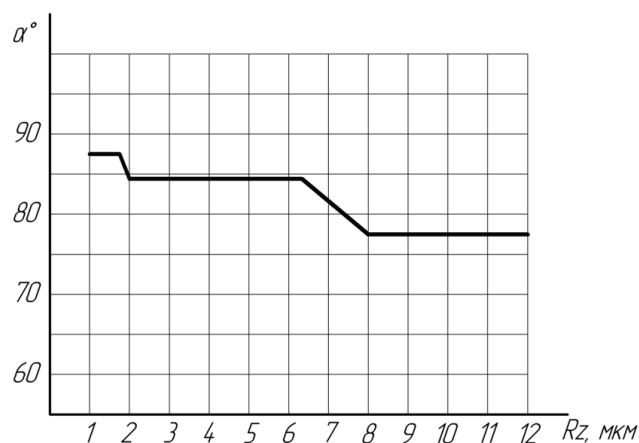


Рисунок 1.
Зависимость половины угла профиля от высоты микронеровности

Таблица 1.

	Фракция абразива	Марка стекла	Высота профиля Rz, мкм	Угол профиля 2α	Ошибка измерения	
					G	Δвер.
Свободный абразив	M10	К-8	2.0	169°48'	2°02'	1°22'
	M14	-//-	2.5	168°20'	1°52'	1°16'
	M20	-//-	6.3	169°	2°38'	1°47'
Связанный абразив	АСМ10/7	БФ-8	1.6	175°12'	53'	36'
	-//-	КФ-6	1.25	174°54'	1°03'	43'
	-//-	ЛК-5	1.0	175°44'	52'	35'
	АСМ28/20	БФ-8	4.0	169°32'	1°39'	1°07'
	-//-	КФ-6	3.2	168°06'	2°24'	1°37'
	-//-	ЛК-5	2.5	169°36'	2°24'	1°37'

ОБРАЗОВАНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА И СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОЛИРОВКЕ СТЕКЛА

Если по шлифованию стекла за последние 100 лет был выполнен огромный объем теоретических и экспериментальных работ по всему диапазону обработки, начиная с грубой шлифовки и кончая мелкой шлифовкой, то вопросам образования микрорельефа полированной поверхности уделялось не достаточно большое внимание.

Это связано с тем, что при полировании основное внимание уделяется качеству формообразования, а микрорельеф оставался на втором плане. Типовые технологии полирования оптических поверхностей обеспечивали необходимые параметры оптических систем в видимом, ближнем и дальнем ИК-диапазонах. Широкое применение в 60-70 гг. прошлого века квантовых генераторов (лазеров) и силовой оптики потребовало применение оптических деталей с минимальным рассеянием энергии на поверхности. Эти требования стали предъявлять к оптическим системам предназначенными для фиксации слабых сигналов.

Освоение УФ-диапазона тоже потребовало применения оптических деталей с минимальными потерями энергии на поверхности.

Если при шлифовании стекла основным фиксируемым параметром является микрогеометрия поверхности, то для сверхгладких поверхностей основным параметром является рассеяние энергии на поверхности, являющейся функцией структуры поверхности. Рассеяние энергии происходит на боковых поверхностях микронеровностей, поэтому угол при вершине микронеровностей играет большую роль.

Согласно теории Престона, микронеровности образуются при пересечении царапин от абразивных зерен, приводящих к выколкам стекла. Поэтому боковые поверхности микронеровностей имеют произвольную структуру с разнонаправленными поверхностями (так называемая вторичная шероховатость). Изучение боковых поверхностей актуально, так как они определяют рассеяние энергии на

поверхности, если их размеры (или размеры площадок на гранях) соизмеримы с длиной волны.

В России изучение микроструктуры полированных поверхностей оптических деталей не является приоритетным, что объясняется слабой и устаревшей метрологической базой для проведения исследовательских работ.

На Западе в связи с потребностями в сверхгладких поверхностях для силовой, УФ и рентгеновской оптики эти работы ведутся широким фронтом.

Обзором этих работ является монография Джин М. Беннет и Л. Маттсона «Шероховатость поверхности и рассеяние» [7]. Нужно сказать, что Джин М. Беннет в настоящее время является крупнейшим специалистом в мире по проблемам измерения параметров микрогеометрии поверхностей. Список использованной литературы содержит 241 наименование – практически все, что опубликовано за последние годы.

В монографии рассмотрены все существующие методы исследования микрорельефа поверхностей и выбраны наиболее целесообразные:

1. Оптические профилометры, позволяющие оценивать шероховатость поверхности в диапазоне (20-1) Å.
2. Контактные методы – это профилографы, которые позволяют получить профилограмму поверхности с дискретностью (10-1) Å.
3. Топографические приборы, позволяющие оценить топографию микронеровностей поверхности. Это в основном сканирующие микроскопы и профилометры различных типов. Разрешение (4-5) Å по среднеквадратическому значению.
4. Приборы для измерения полного интегрального рассеивания (TIS). Оценка шероховатости и микрорельефа производится измерением рассеянной энергии от падающего и отраженного от поверхности излучения. Величина сигнала сравнивается с аттестованным эталоном

$$TIS = \frac{\Phi_{pac}}{\Phi_{pac} + \Phi_{zo}} = \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot \delta}{\lambda} \right)^2 \quad (11),$$

где

$\Phi_{рас}$ – величина рассеянной энергии на приемнике, вольт

$\Phi_{зо}$ – величина зеркально отраженной энергии, вольт

δ – среднеквадратичная величина шероховатости

λ – длина волны

В монографии приведены методы обработки результатов измерения и даны их сравнительные точности.

В монографии так же приведены реальные профилограммы поверхностей и дана их статистическая обработка.

В монографии не исследовались углы профиля микронеровностей и глубина трещиноватого (дефектного) слоев.

Используя профилограммы из монографии и отечественные методики можно определить углы при вершине микронеровностей и оценить протяженность боковых поверхностей.

На рис. 2, 3, 4 показаны взятые из монографии профилограммы и приведены результаты их обработки, выполненные на Красногорском заводе им. С.А.Зверева авторами.

На профилограммах определялся угол наклона боковых граней микронеровностей. Полученные результаты представлены на графике рис. 5.

При полировании, так же как и при шлифовании стекла, угол при вершине микронеровностей увеличивается с уменьшением величины Rz.

Это говорит о том, что процесс диспергирования стекла при полировании и шлифовании стекла идентичен и подчиняется одним и тем же закономерностям. Следует отметить, что с уменьшением микронеровностей, длина боковых граней последних растет и составляет несколько длин волн.

Из профилограмм видно, что боковые поверхности микронеровностей имеют сложную структуру, образованную сколами стекла (вторичная шероховатость). Именно эти сколы, соизмеримы с длиной волны и создают рассеяние энергии на поверхности. Характер этих сколов зависит только от механических параметров обрабатываемых стекол.

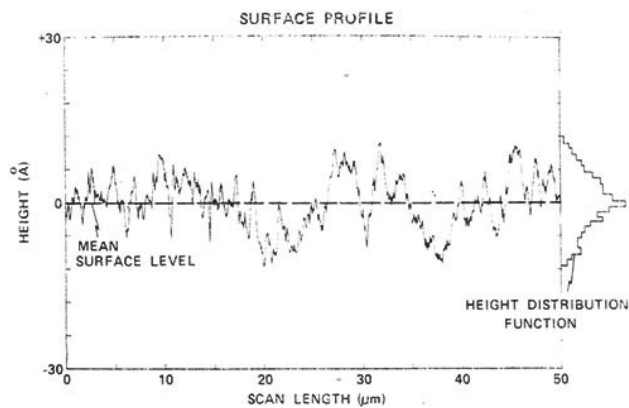


Рисунок 2.

Профилограмма полированной поверхности 1

Масштаб

Вертикальный h_b 1 мм – 0,75 Å

Горизонтальный H_r 1 мм – 0,42 мкм

	$h_{вер}, \text{Å}$	$H_{зоп}, \text{мкм}$	$tg(\alpha) \cdot 10^{-4}$
1	15.4	5.9	2.6
2	19.9	10.3	1.9
3	19.5	7.1	2.7
4	15.0	4.4	3.4
5	18.0	5.7	3.2
6	24.0	8.4	2.9

$$h_{сра} = 18.6$$

$$H_{сра} = 7.0$$

$$tg(\alpha_{ср}) = 2.8 \cdot 10^{-4}$$

$$tg(\alpha_{сра}) = 2.7 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta = 4\%$$

$$\alpha_{сра} = 0.9'$$

Результаты обработки профилограмм трех разных полированных поверхностей представлены на рисунках 2, 3, 4.

Результаты измерений представлены в таблицах.

В современной конструкторской документации для видимого диапазона величина Rz равна 0.05 мкм (или $1/10 \lambda$). Такая шероховатость вполне обеспечивает работоспособность обычных оптических систем.

С появлением силовой оптики $Rz = (1/10)\lambda$ перестало обеспечивать работоспособность оптических деталей.

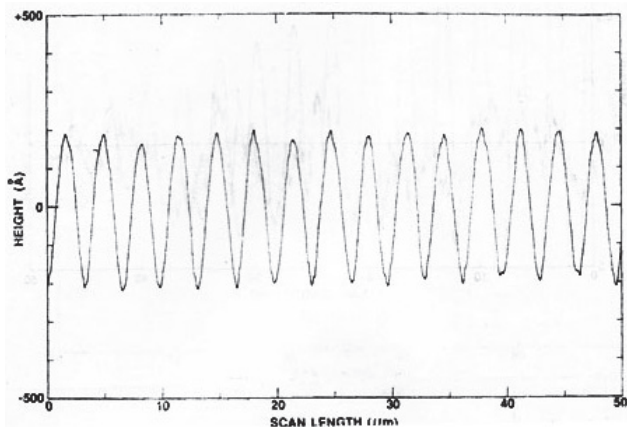


Рисунок 3.

Профилограмма полированной поверхности 2

Масштаб

Вертикальный h 1 мм – 11,36 Å

Горизонтальный H 1 мм – 2,5 мкм

	$h_{вер}, \text{Å}$	$H_{гор}, \text{мкм}$	$tg(\alpha) \cdot 10^{-4}$
1	375	11.7	32
2	330	10.0	34
3	485	10.57	46
4	393	11.25	35
5	478	11.25	42
6	458	10.0	43
7	465	10.0	46
8	500	10.2	50
9	471	9.8	47
10	507	10.6	48

$$h_{сра} = 446$$

$$H_{сра} = 10.5$$

$$tg(\alpha_{сра}) = 42.5 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta = 4\%$$

$$\alpha_{сра} = 14.6'$$

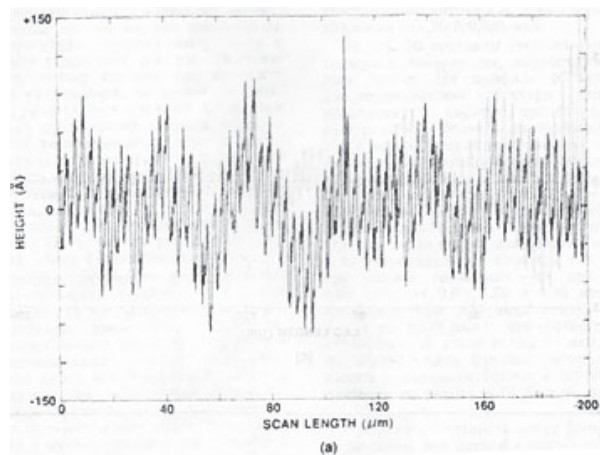


Рисунок 4.

Профилограмма полированной поверхности 3

Масштаб

Вертикальный h 1 мм – 3,41 Å

Горизонтальный H 1 мм – 1,67 мкм

	$h_{вер}, \text{Å}$	$H_{гор}, \text{мкм}$	$tg(\alpha) \cdot 10^{-4}$
1	160.0	8.35	19.16
2	143.0	7.5	19.0
3	191.0	15.0	12.7
4	177.0	13.3	13.3
5	174.0	17.5	9.9
6	184.0	15.0	12.2
7	170.5	10.0	17.0
8	149.0	10.0	14.3
9	156.0	8.35	18.7

$$h_{сра} = 166$$

$$H_{сра} = 11.7$$

$$tg(\alpha_{сра}) = 15.14$$

$$\alpha_{ср} = 5.3'$$

$$\alpha_{сра} = 4.9'$$

$$\Delta = 0.4'$$

Поэтому в ГОИ им. Вавилова была разработана технология глубокой шлифовки-полировки, позволяющая получить $Rz=0.01$ мкм ($Rz=(1/50)\lambda$). Такое соотношение величин микронеровностей и длин волн позволило получить «сверхгладкую поверхность» для видимой и ИК областей спектра и по всей видимости, является оптимальным для формирования сверхгладких поверхностей.

Однако, с появлением УФ диапазона поверхности с $Rz=0.01$ мкм перестают быть сверхгладкими.

При оптимальном соотношении $Rz= (1/50)\lambda$ имеем

	λ , нм	Rz , Å
1	500	100
2	400	80
3	300	60
4	200	40
5	100	20

Для получения шероховатостей (60-20) Å нужны специальные технологии полирования стекла.

Поскольку рассеяние энергии на полированной поверхности имеет интегральную величину, а профилометры и профилографы всех типов интегральной оценки не дают, то наиболее достоверным методом аттестации сверхгладких поверхностей следует считать непосредственное измерение рассеяния энергии.

ВЫВОДЫ

1. Процессы шлифования и полирования стекол подчиняются одним и тем же закономерностям.
2. Рассеяние энергии на поверхности зависит в основном от вторичной шероховатости на боковых поверхностях микронеровностей.
3. «Гладкость» поверхностей для каждой длин волн будет индивидуальной.
4. Для получения сверхгладких поверхностей необходимо удалять трещиноватый (дефектный) слой.

ВЛАГА НА ПОЛИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА

Процесс полирования стекла происходит в среде воды. При механическом разрушении (диспергировании) стекла поверхность стекла активируется, появляются свободные, не закрытые связи, которые закрываются радикалами -ОН. Радикалы -ОН создают по поверхности раздела сред пленку хемосорбированной влаги.

Это пленка настолько прочно связана с поверхностью молекулярной связью, что ее невозможно удалить даже нагреванием на 1000°C . Эта пленка не позволяет получить прочных физических покрытий на поверхности стекла.

Кроме того, на поверхности образуется пленка абсорбированной и капиллярной влаги. Поверхностное натяжение воды в капиллярах создает давление ≈ 20 кг/см². Для того чтобы удалить эту влагу с поверхности детали нужно нагреть до температуры 273°C , при этом давление паров равно давлению от поверхностного натяжения.

По ОСТ 3-1901-85, разработанному ГОИ при нанесении физических покрытий оптических деталей в вакууме, они нагреваются до температуры 300°C . При этом происходит взрывообразное выделение капиллярной влаги, способствующее частичному разрушению трещиноватого слоя и активации поверхности, что повышает прочность физических покрытий.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Механические загрязнения поверхностей оптических деталей бывают двух видов:

- органические загрязнения;
- минеральные загрязнения.

Органические загрязнения – это потожировые отпечатки на поверхности, следы красителей, эфирных масел и другие.

Минеральные загрязнения – это различной крупности пыль из воздушной среды помещения, осевшая на поверхность.

Эти загрязнения являются центрами рассеяния энергии на поверхности, что при-

водит к разрушению поверхности при больших энергетических нагрузках. Для устранения загрязнений разработаны специальные технологии чистки, хранения и транспортирования деталей со сверхгладкими поверхностями:

- работа с оптическими деталями производится в специальных помещениях с соблюдением нормативов по промышленной и личной гигиене исполнителей;
- чистка производится по специально разработанной технологии;
- хранение и транспортировка оптических деталей производится в специальной таре.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для получения сверхгладких поверхностей необходимо:

- отполировать поверхность с заданным уровнем шероховатости,
- удалить трещиноватый (дефектный) слой,
- удалить (или максимально уменьшить) вторичную шероховатость,
- при нанесении покрытий удалить хемосорбированную влагу.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СВЕРХГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статье приведены принципы построения технологии получения сверхгладких поверхностей, разработанные на ОАО «Красногорский завод» им.С.А. Зверева. На заводе разработано 2 технологических процесса полирования сверхгладких поверхностей.

1. Детали обрабатывают по технологии глубокой шлифовки-полировки (ГШП). Процесс полирования периодически останавливают. Детали протравливают в растворе плавиковой кислоты (HF). Если вскрываются микротрещины на полированной поверхности, процесс полировки продолжают с периодическим протравливанием поверхности до тех пор, пока трещины исчезнут.

2. Детали обрабатывают по технологии ГШП. При полировке в суспензию добавляют раствор плавиковой кислоты. Происходит одновременный процесс механической и

химической полировки. При этом вторичная шероховатость удаляется в основном химической полировкой.

Контроль поверхностей производится метрологическим твердотельным импульсным лазером ИТ-181 конструкции ГОИ:

- длительность импульса – 40 нс;
- энергия в импульсе до 5 Дж.

По ОСТ 3-6186-86 лучевая прочность стекла равна 100-120 Дж/см². От каждой партии деталей проверяется 3% до полного разрушения.

НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ

При нанесении покрытий необходимо удалить хемосорбированную влагу. Она удаляется химическим путем при помещении деталей в абсолютированный (обезвоженный) спирт. Абсолютированный спирт «отрывает» от поверхности детали радикалы –ОН и активизирует ее, после чего в вакууме наносится покрытие.

По ОСТ 3-6186-86 прочность покрытия равна 20±4 Дж/см².

По предложенной технологии достигается прочность покрытия 50-60 Дж/см² [8], [9], [10].

Для неразрушающего контроля сверхгладких поверхностей Физическим институтом АН по договору с Красногорским заводом был изготовлен специальный стенд для контроля оптики по рассеиванию энергии на поверхности.

УКОП-1М

Технические данные:

Длина волны лазерного излучения, нм	337
Диапазон измерения коэффициента диффузного светорассеяния	0.0001÷1
Диаметр зондирующего луча, мм	2÷4
Погрешность измерения	±0.00002
Количество измерений в цикле статистической обработки	64
Диапазон поперечного сканирования образца, мм	50
Максимальные габариты образца, мм	160x160

Список литературы:

1. Качалов Н. Основы процессов шлифовки и полировки стекла. Издательство АН СССР, М., 1946 г. Ленинград.
2. Формообразование оптических поверхностей. Сборник статей под редакцией проф. К.Г. Куманина, Государственное научно-техническое издательство, Оборонгиз, М., 1962 г.
3. Исследование процесса полировки стекла. Под редакцией КХИ В.С. Молчанова. Издательство «Машиностроение», М., 1967 г.
4. Чеповецкий И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. «Наукова думка», Киев, 1978 г.
5. Шульман П.А. и др. Качество поверхности, обработанной алмазами. Издательство «Техника», Киев, 1972 г.
6. Горелик Б.Д. Исследования процесса шлифования рабочих деталей алмазными притирками и разработка оптических приборов контроля. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н.

Научный руководитель проф. д.т.н. Семибратов М.Н., МГТУ им.Н.Э. Баумана кафедра П2, Москва 1975 г.

7. Джин М. Беннетт и Ларс Маттсон. Шероховатость поверхности и рассеяние. Оптическое общество Америки. Вашингтон.
8. Афанасьева Г.И., Горелик Б.Д. Химическая обработка стекла. Аналитический обзор за 1980-1990 гг., №5395 Издательство ИТЦ «Информтехника» М., 1993 г.,
9. Горелик Б.Д., Афанасьева Г.И., Родионова Н.Б. Методы повышения энергетической стойкости оптических элементов. Аналитический обзор за 1970-1993 гг. №5552, Издательство ИТЦ «Информтехника», М., 1993 г.
10. Горелик Б.Д., Афанасьева Г.И., Кошаль Е.А. Подготовка поверхности оптических элементов перед финишными операциями. Аналитический обзор за 1980-1993 гг. №5513. Издательство ИТЦ «Информтехника», М., 1994 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕГМЕНТИРОВАННЫХ ВНЕОСЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

МИТРОФАНОВА Ю.С., САННИКОВА И.М., СЕНИК Б.Н.

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

E-mail: joka495@gmail.com

В статье рассмотрены различные методы изготовления крупногабаритных сегментированных внеосевых оптических элементов, проведён краткий аналитический обзор их положительных и отрицательных сторон. На примерах двояковыпуклой и двояковогнутой линз представлены результаты изготовления сегментированных оптических элементов на предприятии ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Ключевые слова: сегментированные оптические элементы, распиловка линз, штрипсовый метод.

При проектировании аппаратуры для дистанционного зондирования Земли из космоса важным является минимизация массогабаритных параметров изделия. В частности, для разработки оптических схем объективов используют компактную трёхзеркальную схему Кука с линзовым компенсатором аберраций. Такая оптическая система имеет внеосевое поле изображения. Примером является двухканальный зеркально-линзовый объектив [1] для рабочего диапазона длин волн 450-1000 нм и 1500-1700 нм (рис. 1). Зеркала являются фрагментами осесимметричных сферических и асферических (первое зеркало) зеркал, а также линзы компенсатора аберраций инфракрасного канала (рис. 1, поз. 7) образуют внеосевые сегментные линзы. Вышеуказанная оптическая схема уменьшает вес конструкции изделия в несколько раз.

В процессе изготовления опытных образцов объектива неизменно актуальной будет задача изготовления высококачественных внеосевых крупногабаритных сегментированных линз с точными габаритными и геометрическими размерами оптических поверхностей. Требуется оптимизация технологического процесса в части последовательности выпол-

нения важнейших операций: изготовления заготовки оптической детали, шлифования, полирования оптических поверхностей, обрезки детали по контуру согласно КД с дальнейшей доработкой нерабочих поверхностей по плоскостности, параллельности базовой поверхности к оптической оси полноразмерной линзы и др. В процессе распиловки готовых оптических деталей необходимо исключить или минимизировать возникновение внутренних деформаций и ухудшение качества оптических поверхностей.

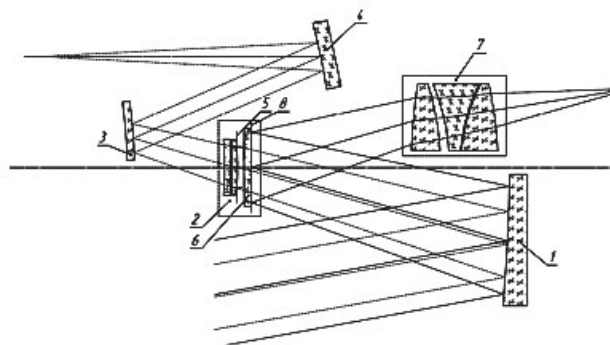


Рисунок 1.

Двухканальный зеркально-линзовый объектив

Существует несколько различных способов распиловки готовых оптических элементов:

- 1) метод гидроабразивной резки;
- 2) с использованием специализированных лазерных установок;
- 3) с использованием алмазного инструмента;
- 4) штрипсовый метод (распиловка с использованием алмазной проволоки).

Гидроабразивная резка имеет важное преимущество - отсутствие теплового воздействия во время взаимодействия с оптической деталью. Таким методом можно распиливать оптические заготовки толщиной до 250 мм и произвольным диаметром, с различной формой контура и уровня сложности.

Процесс лазерной резки происходит за счёт взаимодействия лазерного излучения с материалом оптической детали или заготовки в зоне резки по всей толщине. Этот метод высокоскоростной и прецизионный, позволяет получать изделия различной геометрии и степени сложности.

Необходимо отметить, что распиловка не должна вносить дополнительных напряжений в объёме оптической детали или заготовки и значительных деформаций оптических поверхностей детали.

Бесконтактные методы распиловки: с использованием лазерного излучения и гидроабразивной жидкости, имеют преимущества над остальными вышеуказанными методами, в частности, позволяют избежать появления микротрещин и сколов. Но распиловка первым методом происходит под давлением тонкой струи жидкости, которое достигает 400 МПа, вследствие чего в объёме детали образуются внутренние напряжения, что в свою очередь приводит к деформации оптических поверхностей, поэтому гидроабразивная резка для этих целей неприемлема. Метод лазерной резки также имеет недостаток – тепловое воздействие на стекло, что увеличивает риск самопроизвольного разрушения стекла и может привести к изменению геометрии оптических поверхностей и к растрескиванию по причине термоудара.

Использование алмазных фрез наиболее простой и доступный метод, широко используется для распиловки заготовок стекла, но

не подходит для наших задач - получения сегмента уже готовой линзы, так как при распиловке происходит частично пластическая деформация детали, вызывающая образование напряжений и изменение геометрии оптических поверхностей. Это контактный метод, при котором распиловка осуществляется выступающими над поверхностью режущего слоя алмазами при интенсивной подаче смазочно-охлаждающей жидкости. Этот метод предназначен для прямолинейной распиловки. Продолжительная непрерывная работа приводят к перегреву режущей части фрезы, что негативно сказывается на ее ресурсе: при температуре около 700°C начинается графитизация алмазов. После распиловки края неровные, острые и имеют различные зазубрины. Грани такого стекла обладают недостаточной прочностью и могут подвергаться крошению.

Распиловка стекла алмазной проволокой на технологическом оборудовании подходит для крупногабаритных деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности и чистоте обработки. Также как и при распиловке алмазными фрезами, при использовании штрипсового метода необходимо обеспечивать охлаждение режущего инструмента. Основное достоинство распиловки стекла алмазной проволокой - это малые термодинамические нагрузки на деталь, возникающие в зоне контакта инструмента с обрабатываемой деталью, что обеспечивает максимальное сохранение геометрии сферических поверхностей и минимизирует повреждение поверхностных и приповерхностных слоёв при правильном подборе скорости подачи, усилия натяжения и диаметра проволоки, а также шага реза. Усилие на деталь составляет всего 0,15-2,00 Н, поэтому этот метод наиболее подходит для распиловки вышеуказанного класса оптических деталей. Диаметр алмазной проволоки в пределах 0,15-0,3 мм.

После распиловки кромки детали имеют шероховатую поверхность. Дальнейшие операции подшлифовки обеспечивают требуемую геометрию и качество готового изделия из стекла.

Из всех перечисленных методов оптимальным для решения наших задач является штрипсовый метод распиловки. Отработка специальных технологий является неотъемлемой частью этапов производства уникальных оптических элементов. На предприятии ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» экспериментальная работа проводилась на крупногабаритных двояковыпуклой и двояковогнутой линзах диаметрами 350 мм. Определялись базовые поверхности и последовательность каждого распила, подобраны режимы и скорости резания.

Для выполнения операции распиловки проектировалось и изготавливалось необходимое технологическое оснащение, оптические детали фиксировались на специальных блокировочных приспособлениях.

С целью определения состояния внутренних напряжений после каждой распиловки проводились интерференционные измерения и фиксировались интерферограммы, по которым можно определить возможные изменения состояния оптических поверхностей.

Основным критерием отсутствия деформации в сегментах являлось наличие или отсутствие (изменение) состояний интерференционной картины в зоне распила методом сравнения интерферограмм после каждого реза с интерферограммами исходных линз. После анализа интерференционных картин был подтверждён технологичный метод распиловки двояковыпуклой крупногабаритной линзы по данной технологии.

Распиловка двояковогнутой линзы осложнялась конфигурацией детали (крупногабаритная деталь диаметром 350 мм, толщина по центру 25 мм, соотношение толщины по центру к диаметру 1:15), поэтому существовал большой риск изменения формы поверхностей. Экспериментальным путём найден эффективный способ разгрузки детали – блокировки линзы на сферический инструмент из дерева с пазами для выхода алмазной проволоки после распиловки. При каждой распиловке деталь базировалась на сферическую поверхность, а после подшлифовывалась до необходимых размеров. Данная технология

обеспечила необходимое сохранение качества поверхностей сегментов и необходимых геометрических размеров.

Результаты интерферометрического контроля исходных деталей и полученных сегментов приведены на рисунках 2-7.

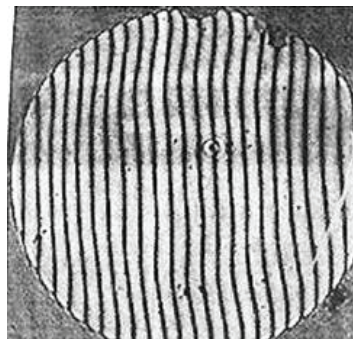


Рисунок 2.

Интерференционная картина исходной двояковыпуклой линзы $R=400$ мм

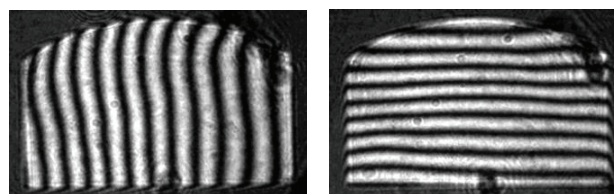


Рисунок 3.

Интерференционная картина сегмента двояковыпуклой линзы $R=400$ мм

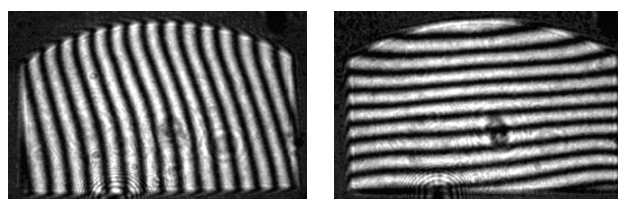


Рисунок 4.

Интерференционная картина сегмента двояковыпуклой линзы $R=400$ мм

Местные ошибки исходной поверхности двояковыпуклой линзы с $R400$ на $\varnothing 350$ мм: $\Delta N=0,541$ (рис. 2).

Местные ошибки в пределах световой зоны двух сегментов линзы: $\Delta N=0,377$ (рис. 3) и $\Delta N=0,363$ (рис. 4).

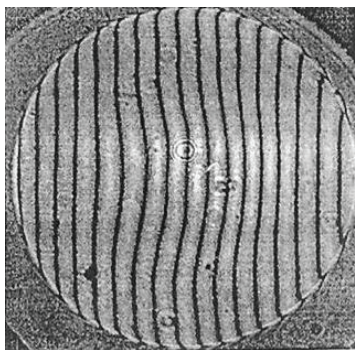


Рисунок 5.

**Интерференционная картина исходной
двоковыгнутой линзы $R=300$ мм**

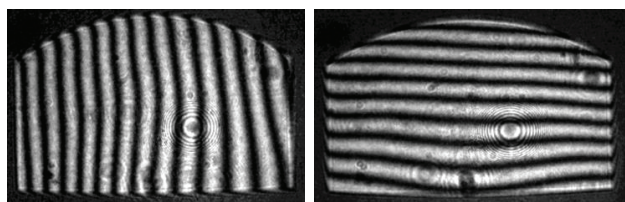


Рисунок 6.

**Интерференционная картина сегмента
двоковыгнутой линзы $R=300$ мм**

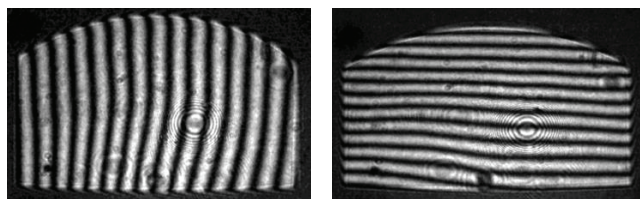


Рисунок 7.

**Интерференционная картина сегмента
двоковыгнутой линзы $R=300$ мм**

Местные ошибки исходной поверхности двояковыгнутой линзы с $R300$ на $\text{Ø}350$ мм: $\Delta N=0,602$ (рис. 5).

Местные ошибки в пределах световой зоны двух сегментов линзы: $\Delta N=0,583$ (рис. 6) и $\Delta N=0,647$ (рис. 7).

Таким образом, с помощью технологического метода - штрипсовой распиловки крупногабаритных оптических элементов, возможно изготовление готовых сегментов без изменения геометрии оптических поверхностей. Полученные интерферограммы сегментированных линз подтверждают неизменность геометрии с геометрией оптических поверхностей исходных деталей, что в свою очередь является положительным результатом проведения экспериментальных работ. Предложенная технология может быть применима для изготовления сегментированных крупногабаритных деталей. Описанная технология весьма актуальна для решения различного рода задач проектирования и изготовления оптико-электронных приборов и комплексов специального назначения и требует дальнейшего совершенствования.

Список литературы:

1. Архипов С.А., Заварзин В.И, Морозов С.А., Ли А.В., Линько В.М., Кравченко С.О. Зеркально-линзовый объектив // Патент № 2547170РФ, 2015.
2. Тезисы докладов научно-технической конференции «Размерная стабильность материалов и конструкций оптических и оптико-электронных приборов», г. Красногорск, 2014.
3. Справочник технолога-оптика. Издательство: Спб.: Политехника, 2004.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПЛОСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО CVD ZnSe С ПОСЛЕДУЮЩИМ НАНЕСЕНИЕМ ПОКРЫТИЙ

ТИМОФЕЕВ О.В., ЛЕОНОВ Е.С.

R'AIN Group (ООО «НН Оптика»), г. Нижний Новгород

E-mail: timofeev@nnoptics.com, ev_leonov@list.ru

В статье рассмотрены современные методы контроля качества оптических поверхностей элементов плоской и сферической формы на основе селенида цинка с использованием оптической и атомно-силовой микроскопии. Разработанные методики контроля эффективно применяются для управления процессами формообразования оптических поверхностей на всех стадиях механической обработки.

Ключевые слова: оптическая и атомно-силовая микроскопия, селенид цинка, качество поверхности, шероховатость поверхности, просветляющие покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

Формообразование оптических поверхностей деталей из стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов, оптической керамики и других неметаллических материалов в современном производстве производят методами алмазно-абразивной обработки. Финишное формообразование осуществляют либо методом алмазного точения, либо традиционным методом притира.

Несмотря на значительный прогресс в области создания оптических элементов, механизмы и эффекты воздействия полировальных материалов, химических реагентов и условий их применения на поверхность оптического материала изучены не достаточно. Существующие в настоящий момент теоретические представления о механизмах полирования [1-3] относятся в большинстве своём к стеклообразным материалам и не могут дать полного представления о механизмах образования нарушенного слоя в процессе механохимического воздействия на кристаллы селенида и сульфида цинка [4, 5]. Приме-

няемые для обработки материалы и условия проведения процессов механохимической модификации поверхностей поликристаллических халькогенидов цинка являются предметом ноу-хау и информация по данному вопросу в литературе практически отсутствует.

Для выявления механизмов механохимического воздействия на поверхность и механизмов дефектообразования в результате такого воздействия необходимы надёжные методы контроля чистоты поверхности обрабатываемого материала. Однако оценка качества поверхности сводится к субъективному суждению исследователя, в значительной мере зависит от опыта и квалификации последнего и является довольно приблизительной [6]. Новые возможности в решении этих проблем предоставляют современные цифровые технологии и программные методы распознавания образов. Существующие разработки дают общие принципы и некоторые приёмы этой технологии. Наличие современных методик позволит не только облегчить и ускорить работу, но и повысить единообразие критериев, используемых для оценки

качества поверхности, как на стадии изготовления, так и на стадии выходного контроля оптических элементов.

Поэтому целью настоящей работы являлась разработка методик оценки качества поверхностей оптических элементов на основе поликристаллических селенида цинка, которые позволяли бы осуществлять контроль за процессами формообразования, как на стадии предварительной обработки, так и на стадии финишной полировки. А также внедрение разработанных методик в производство.

В настоящее время в г. Дзержинск (Нижегородской области) организовано производство, представляющее собой комплексное решение, объединяющее под одной крышей три этапа изготовления оптических элементов: выращивание крупногабаритного мультиспектрального материала CVD ZnSe, механическую обработку и нанесение покрытий, что в совокупности составляет полный цикл производства оптических элементов.

Компания владеет современным оборудованием и на данный момент выращивает крупногабаритный материал высокочистого поликристаллического селенида цинка методом осаждения из газовой фазы (CVD-метод). В настоящее время производительность установки составляет 500 кг в

месяц, при максимальных размерах пластин 1320x680x25 мм. Выход установки на полную производственную мощность позволит увеличить производительность до 800 кг в месяц при максимальных размерах пластин 1320x1200x40 мм.

Наличие большого количества качественного материала и современного оборудования позволяет выпускать полный перечень оптических элементов на нашем производстве (рис. 1):

- пластины любой формы и конфигурации с наибольшей диагональю до 500 мм и толщиной до 20 мм;
 - призмы различной конфигурации;
 - окна диаметром до 300 мм;
 - обтекатели диаметром до 300 мм;
 - линзы сферические диаметром до 300 мм;
 - линзы асферические диаметром до 140 мм;
- Участок механической обработки оснащен как новым, так и модернизированным оборудованием, позволяющим проводить черновую обработку материала, изготовление заготовок, предварительную полировку, а также изготовление изделий сложной профильной формы, и финишную полировку оптических элементов.

Имеется полный комплекс оборудования для проведения заготовительных работ.

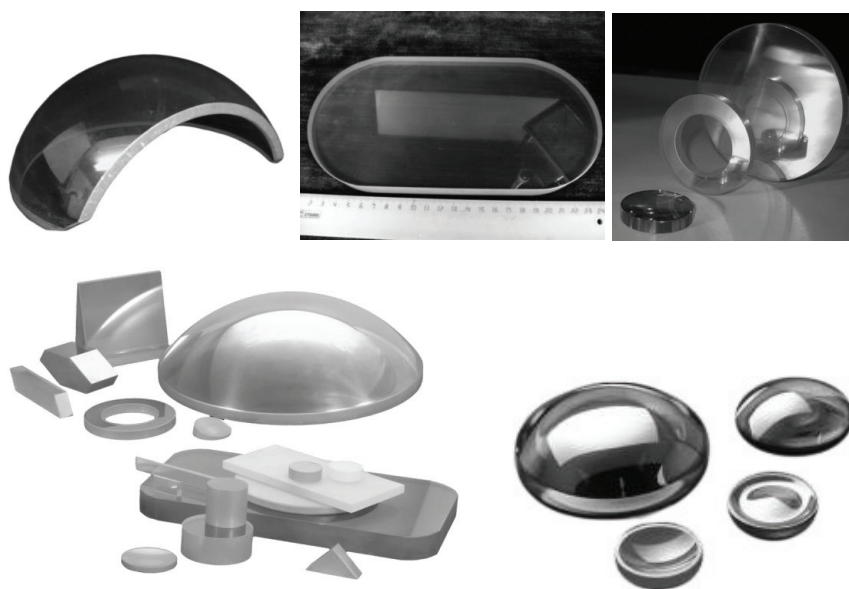


Рисунок 1.

Примеры оптических элементов из поликристаллического ZnSe

Предварительное формообразование плоских, сферических и асферических поверхностей осуществляется на новейших автоматизированных обрабатывающих центрах немецкой фирмы Шнайдер (SCG_A-100 и SLG-301). Для финишного формообразования оптических поверхностей участок оснащен модернизированным полировально-доводочным оборудованием, позволяющим обрабатывать прецизионные оптические поверхности с наибольшей диагональю от 5 до 500 мм с точностью формы до $\lambda/8$. Высокоскоростная полировка осуществляется на автоматизированном обрабатывающем центре немецкой фирмы Шнайдер (SCP_A-100), с функцией асферизации.

Основные задачи при изготовлении оптических элементов – это получение высококачественных, бездефектных поверхностей с минимальными отклонениями от заданной формы за минимально короткое время и при минимальных материальных, энергетических и трудовых затратах. Решение данных задач возможно при использовании современных технологий предварительного и финишного формообразования исполнительных оптических поверхностей. Так в ходе предварительного шлифования необходимо получить поверхность с минимальными отклонениями формы и минимальной шероховатостью. В процессе же полирования необходимо получить оптические поверхности с наилучшей чистотой и минимальными отклонениями по геометрии. Данные задачи

были успешно решены в ходе проведения НИР (работ) и разработки технологии механической и химико-механической обработки поликристаллического селенида цинка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для управления процессами формообразования, которые осуществляются на современных высокоточных обрабатывающих центрах необходимо иметь соответствующие методы контроля. В нашем распоряжении имеется «Измерительная система LurhoScan 260» (рис. 2) позволяющая осуществлять бесконтактные и высокоточные измерения осесимметричных поверхностей. Измерения можно производить на полированных, шероховатых, прозрачных, отражающих и непрозрачных поверхностях. Основным преимуществом является совместимость измерительной системы с шлифовальным (Шнайдер SCG_A-100 и SLG-301) и полировальным (Шнайдер SCP_A-100) обрабатывающими центрами и возможность управления процессами обработки.

Были проведены исследования влияния размера зерна шлифовального и полировального абразива на морфологию и шероховатость оптических поверхностей в процессе их формообразования. Для этого была разработана методика оценки шероховатости поверхности оптических элементов на основе селенида и сульфида цинка в соответствии с ГОСТ Р 8.700-2010. Оценка шероховатости поверхности проводилась на атомно-сило-



Рисунок 2.
Измерительная система LurhoScan 260

Таблица 1

Размер зерна абразива, мкм	Ra (среднее), нм	Rq (среднее), нм
Шлифовальные порошки		
20	299,8	376,6
10	222,8	284,8
5	167,0	211,9
3	186,5	234,6
Полировальные порошки		
5	7,7	9,9
3	4,7	6,1
2	2,7	4,0
1	2,0	2,9

вом микроскопе NT-206. В таблице приведены значения среднеарифметической (Ra) и среднеквадратичной (Rq) шероховатости поверхности селенида цинка в зависимости от величины зерна абразива в процессе механической обработки, как для процесса шлифования, так и для процесса полирования. Видно, что уменьшение размера зерна абразива приводит к уменьшению шероховатости поверхности в обоих случаях. Однако

различие между величинами шероховатости поверхностей после шлифования и полирования микропорошками с одинаковой величиной зерна (5 мкм) достигает 20 раз. Кроме того, уменьшение среднеквадратичной и среднеарифметической шероховатости при уменьшении размера зерна абразива в процессе шлифования происходит намного медленнее, чем в процессе полирования. Это объясняется различием в механизмах образования шлифованной и полированной поверхностей.

Изображения рельефа шлифованной и полированной поверхности халькогенидов цинка, полученные методом СЗМ (сканирующей зондовой микроскопии), приведены на рисунках 001 и 002. Сравнивая изображения шлифованной и полированной поверхностей (рис. 3 и 4) можно видеть, что в первом случае поверхность состоит из бугров и ям, которые образуются в процессе обработки под действием зерен абразива. Согласно классическим теориям [1-3] в процессе шлифования обработка идет за счет скалывания материала

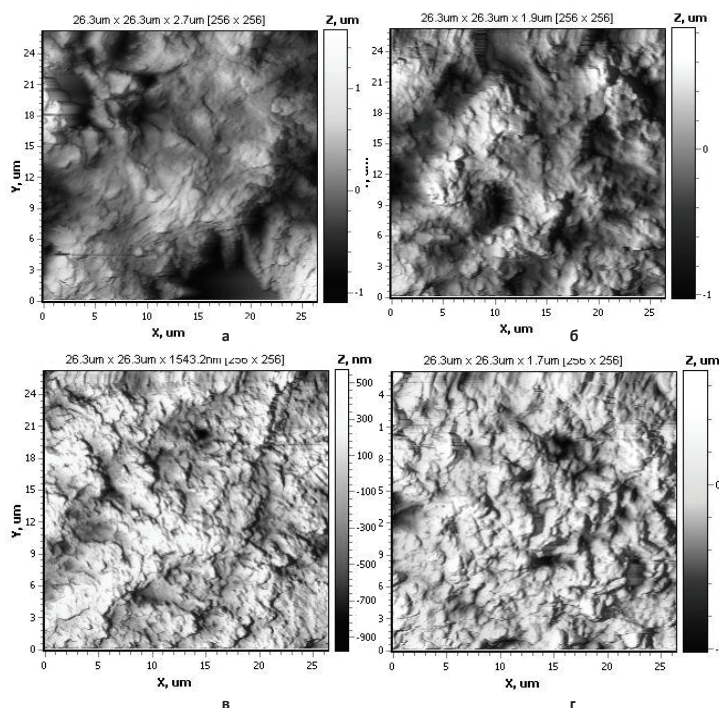


Рисунок 3.

Изображения рельефа шлифованных поверхностей селенида цинка, обработанных на микропорошках электрокорунда с различной величиной зерна, полученные методом СЗМ: а – 20 мкм; б – 10 мкм; в – 5 мкм; г – 3 мкм

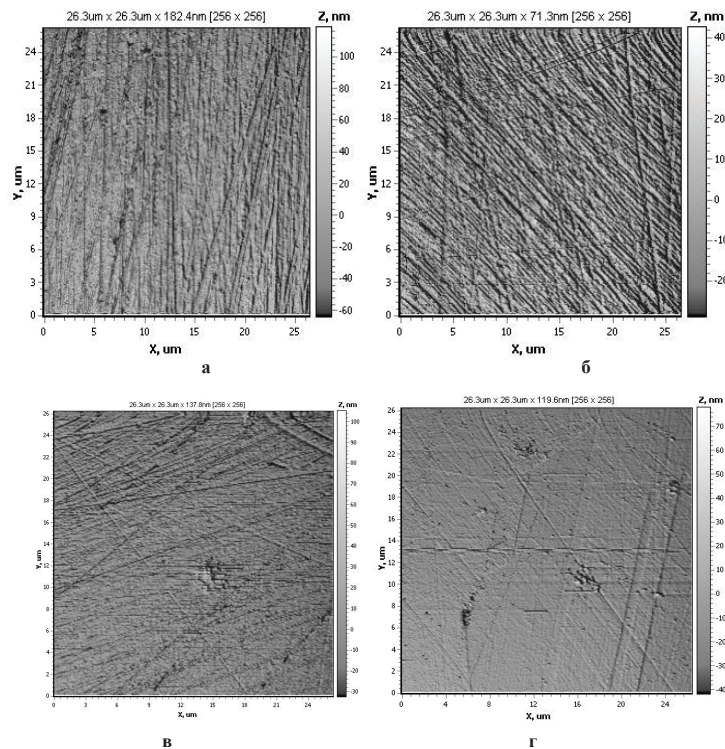


Рисунок 4.

**Изображения рельефа полированных поверхностей селенида цинка, обработанных на микропорошках с различной величиной зерна, полученные методом СЗМ:
а – 5 мкм; б – 3 мкм; в – 2 мкм; г – 1 мкм**

с обрабатываемой поверхности, резания поверхности в данном случае не происходит. На изображениях отсутствуют протяженные дефекты, которые можно было бы отнести к царапинам. Таким образом, как для стекла, так и для кристаллических материалов (селенид и сульфид цинка) механизм шлифования на первый взгляд одинаков, однако есть и различия. В нашем случае это отсутствие на обрабатываемой поверхности пластически деформированных участков.

Из рисунка 4 видно, что уменьшение размера зерна абразива с 5 до 1 мкм приводит к изменению морфологии обрабатываемой поверхности селенида цинка. Если морфология поверхности, обработанной микропорошком с величиной зерна 5 мкм, определяется рельефом, созданным в процессе резания поверхности, то по мере уменьшения величины зерна наблюдается изменение рельефа и появление ровных участков.

Показано, что среднеарифметическое и среднеквадратичное отклонение профиля поверхности нелинейно убывает с уменьше-

нием размера зерна абразива. Это говорит о том, что уменьшение эффективного размера зерна в процессе полирования описывается нелинейной функцией. Минимальное значение среднеарифметического отклонения и среднеквадратичного отклонения достигнуто в процессе механического полирования с использованием микропорошка с величиной зерна 1 мкм и составило 1,9 нм и 2,9 нм, соответственно.

Для подтверждения полученных нами результатов были проведены независимые измерения в лаборатории сканирующей зондовой микроскопии Научно-образовательного центра «Физика твердотельных наноструктур» (НОЦ ФТНС) Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (ННГУ). Полученные результаты показали хорошую воспроизводимость.

Обработка плоских и сферических поверхностей с достаточно большими габаритами не возможна без использования блокировки оптических деталей. В процессе роста материала поликристаллы селенида цинка боль-

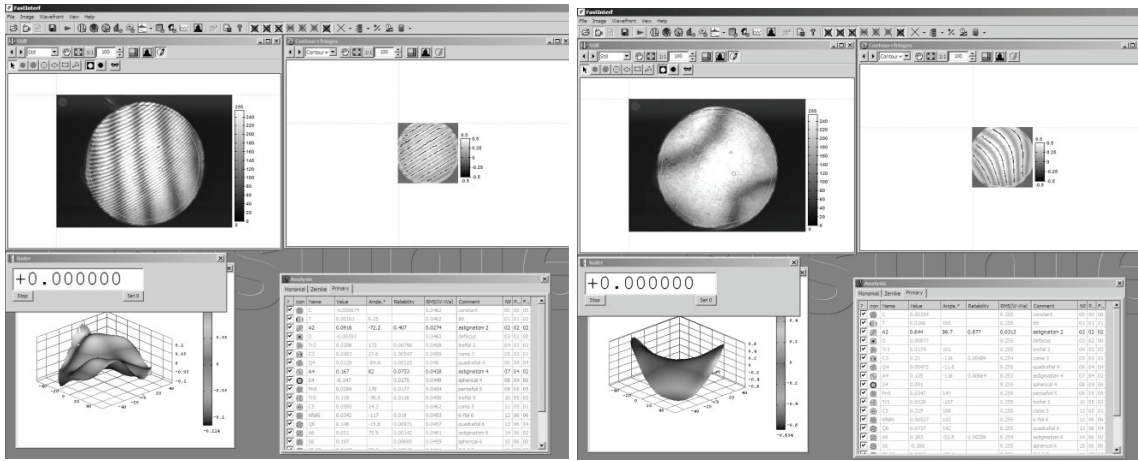


Рисунок 5.

Изменение геометрии поверхности в процессе обработки прямоугольных пластин из селенида цинка с размерами 250x150x16 мм (до и после расклейки)

ших размеров приобретают структурные напряжения, которые оказывают существенное влияние на геометрию плоских и сферических поверхностей оптических элементов в процессе их обработки. Для решения обозначенной проблемы мы обрабатывали детали плоской и сферической формы с различными габаритными размерами и толщиной, и наблюдали изменение геометрии поверхности в процессе обработки. Полученные результаты представлены на рис. 5 (на примере пластины с размерами 250x150x16 мм), где приведены интерферограммы поверхностей после изготовления до и после расклейки. Видно, что после разблокировки происходит ухудшение геометрии поверхности, связанное с внутренними и наведенными внешними напряжениями (на интерференционной картине наблюдается искривление интерферен-

ционных полос и образование седловидной поверхности). Данная проблема была нами решена и в результате разработанной технологии мы добились 100 % воспроизводимых результатов по геометрии поверхности, как на блоке, так и после разблокировки пластин.

Для оценки качества полированных поверхностей была разработана компьютерная методика [7], которая основана на ГОСТ 11141-84, включающая в себя получение увеличенной картины поверхности методом оптической микроскопии и компьютерное распознавание типа и геометрических размеров дефектов, а так же количественное определение их содержания. Предложенная компьютерная методика основана на распознавании дефектов поверхности, образующихся в процессе механического и механохимического воздействия по микрофотографиям (рис. 6).



Рисунок 6.

Фотографии полированной поверхности селенида цинка

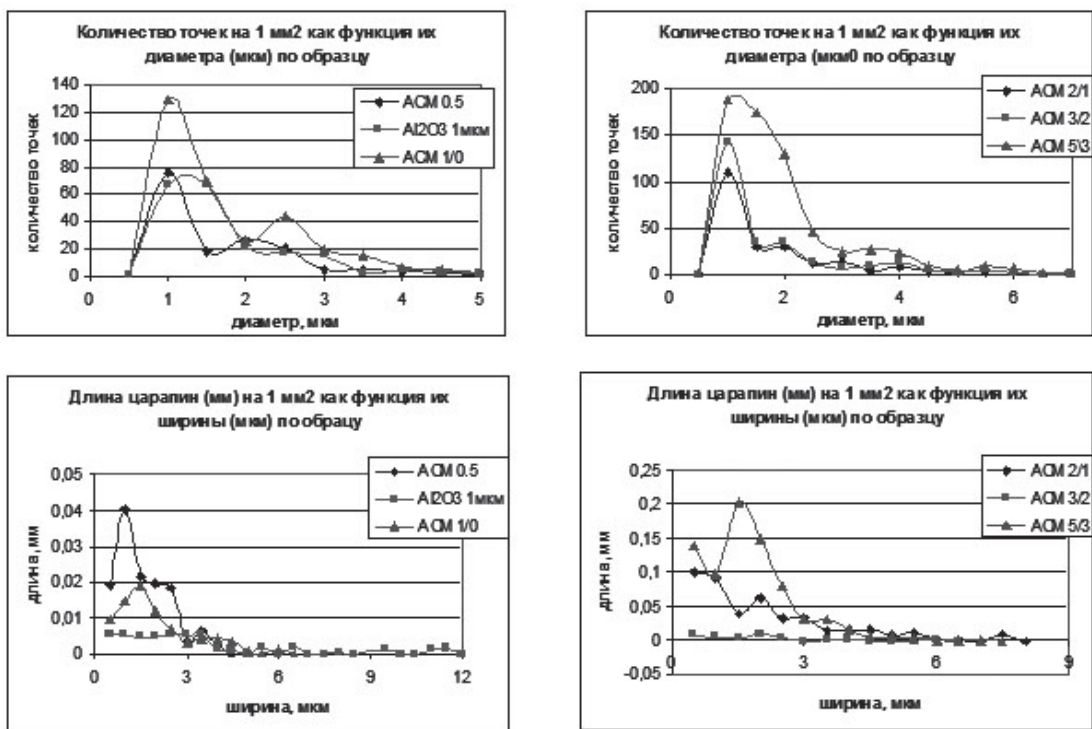


Рисунок 7.

Функции распределения царапин и точек на поверхности образцов селенида цинка в зависимости от размера зерна абразива

Набор из нескольких десятков фотографий одного образца программа объединяет с соответствующей весовой функцией в единый набор данных, и по ним строятся функции распределения дефектов по размерам (рис. 7). В результате оператор получает функции распределения дефектов поверхности (царапин и точек) по размерам, на основании которых программа классифицирует контролируемую поверхность по чистоте в соответствии с ГОСТ 11141-84 сразу по нескольким параметрам.

Финишная полировка не является конечным этапом производства оптических элементов. Оптические элементы, за редким исключением, требуют нанесения просветляющих покрытий. При этом покрытие зачастую выполняет еще и защитную функцию.

Для разработки и нанесения оптических покрытий используется современное вакуумное напылительное оборудование: вакуумная установка Ортус 1100 (рис. 8), вакуумная установка Ортус 700, чистые помещения и ламинарные модули.

Имеющееся оборудование позволяет наносить весь спектр покрытий для ИК - оптики.

Контрольно-измерительное оборудование, расположенное на участке, используется для определения свойств получаемых покрытий: спектрометры (ИК и Видимый диапазон), оптические стенды для проверки и испытаний оптики.

На данный момент разработаны и прошли испытания просветляющие покрытия на 10,6 мкм с высокой лучевой стойкостью, широкополосные просветляющие покрытия (в том числе, покрытия на диапазон от 7 до 14 мкм),



Рисунок 8.

Вакуумная установка Ортус 1100 на участке нанесения покрытий

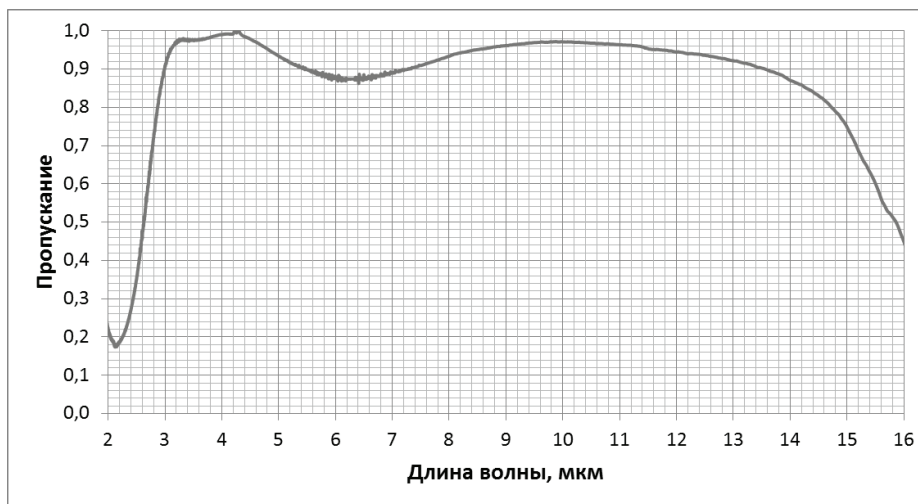


Рисунок 9.
Спектральная характеристика образца селенида цинка с двухполосным просветляющим покрытием

широкополосные двух диапазонные покрытия (покрытия с просветлением на два диапазона: от 3 до 5 мкм и от 8 до 12 мкм) (рис. 9) и др. В настоящее время ведется разработка 2 и 3 диапазонных просветляющих покрытий на селениде и сульфиде цинка с просветлением в видимой части спектра и защитных водоотталкивающих покрытий с повышенной механической прочностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработаны техпроцессы, изготовлена оснастка и найдены технические решения позволяющие обрабатывать поверхности заготовок из селенида цинка диаметром от 15 до 350 мм любой формы и конфигурации с точностью до 0,01-0,001 мм. Применяемые на производстве технологии позволяют изготавливать оптические элементы на основе поликристаллического селенида цинка с качеством поверхности на уровне 3-4 класса чистоты по ГОСТ 11184-41 и 40/20 по MIL-O-13830A.

В настоящее время проводятся исследования процессов обработки оптических элементов на основе селенида цинка, направленные на улучшение класса чистоты поверхности до уровня 20/10 и повышения точности формы плоских и сферических поверхностей.

Для контроля получаемых результатов используется самое современное измерительное оборудование.

Список литературы:

1. Винокуров В.М. Исследование процесса полировки стекла. М.: Машиностроение. – 1967. – 196с.
2. Ходаков Г.С. Кудрявцева Н.Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. - М.,1985., с. 224.
3. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. М.: Знание. – 1967. – серия IV № 39, 40. - 64с.
4. Гаврищук Е.М. Поликристаллический селенид цинка для ИК оптики. //Неорганические материалы. – 2004. – Т.39. №9. – с. 1031 - 1049.
5. Гаврищук Е.М., Яшина Э.В. Оптические элементы из сульфида цинка и селенида цинка для инфракрасной техники. // Оптический журнал. - 2004.- Т. 71. № 12.- С. 24 –31.
6. Окатов М.А., Байгожин А., Антонов Э.А. и др. Справочник технолога-оптика / Под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679с.
7. Тимофеев О.В., Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Колесников А.Н. Исследование полированных поверхностей халькогенидов цинка путём компьютерного распознавания дефектов на микрофотографиях. //Оптический журнал - 2010- Т.77.-№1 -С.87-94.

КРУПНОГАБАРИТНЫЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ СЕЛЕНИДА ЦИНКА, ПОЛУЧЕННЫМ МЕТОДОМ CVD ДЛЯ ДИАПАЗОНА 0,5 – 14 МИКРОН

НОВИКОВ В.П., ГАВРИЩУК Е.М., МАЗАВИН С.М., ТИМОФЕЕВ О.В.

R'AIN Group (ООО «Интеллектуальные системы НН», ООО «НН Оптика»), г. Нижний Новгород

E-mail: novikov@r-aingroup.com, mazavin@ihps.nnov.ru, gavr@ihps.nnov.ru timofeev@nnoptics.com

В статье описана организация в компании R'AIN Group производства и обработки крупногабаритного мультиспектрального материала селенида цинка (CVD-ZnSe) мощностью 500 кг в месяц. Описаны возможности оптического производства и представлены характеристики качества производимого компанией материала на уровне лучших мировых образцов.

Ключевые слова: поликристаллический селенид цинка, метод CVD, микро-неоднородности, объемное поглощение, мультиспектральный.

ВВЕДЕНИЕ. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ.

История компании «НН Оптика» берет свое начало в 1991 году, когда в Институте химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятых РАН образовался коллектив талантливых ученых, впоследствии докторов химических наук – будущих основателей компании. ИХВВ РАН можно по праву назвать альма-матер отечественной промышленности по производству поликристаллического селенида и сульфида цинка [1-5]. Именно в ИХВВ РАН, впервые в нашей стране, были проведены исследования и были получены первые в стране образцы селенида цинка лазерного качества методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-метод). В ИХВВ РАН проводились комплексные исследования процессов механической и химико-механической обработки поликристаллического селенида цинка [6-8]. Результаты данных исследований легли в основу технологических процессов, которые были успешно внедрены в производство.

В 2013 году компанией были привлечены инвестиции, и создана группа компаний R'AIN Group в которую помимо ООО «НН Оптика» вошла управляющая компа-

ния ООО «Интеллектуальные системы НН». Возведены новые производственные корпуса (рис. 1), закуплено новейшее оборудование по получению крупногабаритного селенида цинка методом CVD (рис. 2), а так же значительно обновлен и расширен станочный парк, в том числе и за счет автоматизированных обрабатывающих центров шлифовки и полировки с ЧПУ.

Для предварительного и финишного формообразования плоских, сферических и асферических поверхностей используются новейшие автоматизированные обрабатывающие центры немецкой фирмы Шнайдер (SCGA-100, SLG-301, SCPA-100) (рис. 3). Контроль качества получаемых оптических поверхностей осуществляется на современном, высокоточном контрольно-измерительном оборудовании ведущих мировых производителей. Для разработки и нанесения оптических покрытий используется современное вакуумное напылительное оборудование, которое позволяет наносить весь спектр покрытий для ИК-оптики от видимого до дальнего ИК диапазона.

Менее года назад обновленное производство начало свою деятельность на вновь созданных производственных площадях.



Рисунок 1.
Производственные корпуса
компании R'AIN Group



Рисунок 2.
Установка синтеза высокочистого
поликристаллического селенида цинка
лазерного качества CVD-методом

К настоящему моменту после опытной эксплуатации предприятие вышло на проектные качественные и количественные показатели.

Размеры получаемых поликристаллов позволяют изготавливать практически любые используемые сегодня оптические элементы из селенида цинка. Кроме того, используемая

в производстве технология выращивания селенида цинка на профилированных подложках позволяет получать объемно-формованные изделия, такие как колпаки и обтекатели полусферической формы. Производственные мощности позволяют получать до 500 кг в месяц товарного CVD селенида цинка.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.
Оборудование оптического производства компании R'AIN Group ООО «НН Оптика»:
а) бесконтактная измерительная система LiphosCan 260,
б) шлифовальный обрабатывающий центр Шнайдер SLG-301,
в) станок двусторонней шлифовки СДШ -100,
г) установка для нанесения просветляющих покрытий Ортус-1000

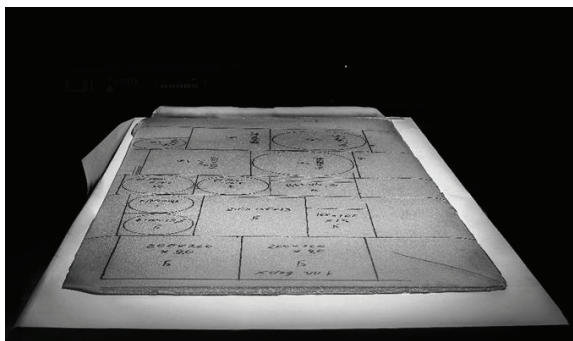


Рисунок 4.

Пластина черного материала поликристаллического селенида цинка с максимальными размерами 1320x680x25 мм

Максимальные размеры получаемого материала составляют 1320x680x25-30 мм (рис. 4).

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОЧИСТОГО ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЕЛЕНИДА ЦИНКА (CVD-ZnSe)

1. Качественные характеристики и параметры, определяющие качество ZnSe, к ним относятся:

- микро-неоднородности;
- объемное поглощение;
- прозрачность в видимом и ИК диапазонах;
- высокий порог пробоя к лазерному излучению.

Микро-неоднородности в поликристаллическом CVD-ZnSe, являются дефектами структуры, эффективный размер которых составляет 0.3 – 0.5 мкм.

К чему приводят микро-неоднородности:

- рассеяние излучения в видимой области спектра, что снижает качество оптических элементов из ZnSe;
- микро-неоднородности являются инициаторами пробоя при использовании ZnSe в лазерной оптике (laser grade).

Уменьшение концентрации микро-неоднородностей до 10^{-5} в см^3 , увеличивает пропускание оптических пластин из ZnSe (без просветления) толщиной 5 мм на длине волны 0.5 мкм до 50% и более, а для длины волны более 0.6 мкм пропускание образцов CVD

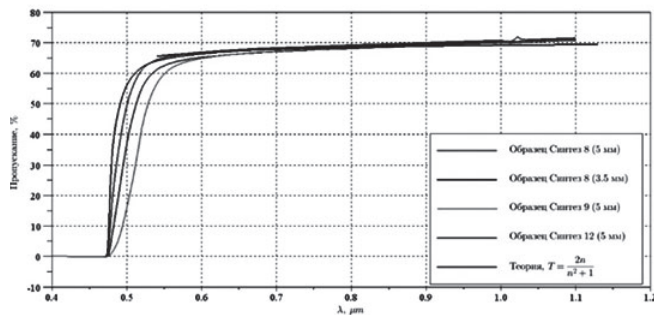


Рисунок 5.

Спектры пропускания поликристаллического селенида цинка

ZnSe вплоть до 12 мкм определяется только отражением Френеля. На рис. 5 показаны спектры пропускания ZnSe в видимом диапазоне спектра и теоретический спектр.

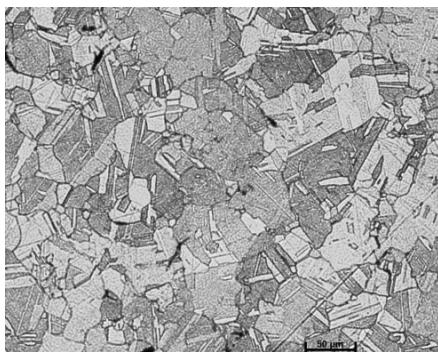
При малой концентрации неоднородностей и примесей в объеме пробой материала CVD-ZnSe при взаимодействии с лазерным излучением наблюдается, как правило, только на поверхности, которая является наиболее дефектной структурой.

Однородность и средний размер зерна образцов ZnSe.

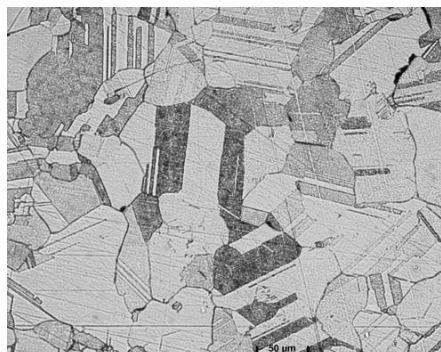
Для материала качества laser – grade средний размер зерна имеет малый разброс - 50-70 мкм. На рис. 6 приведены примеры структуры поверхности наших образцов ZnSe, полученных методом оптической микроскопии (с ростовой части и со стороны подложки).

Объемное поглощение образцов ZnSe.

Для стандартных наших образцов ZnSe поглощение, измеренное нами стандартным методом лазерной калориметрии на длине волны 10.6 мкм, составляет $(4-6) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$. Общие потери на поглощение, измеренные на специально полированных образцах ZnSe толщиной 3 мм методом лазерной калориметрии нами, а также в Научно-исследовательском центре технологических лазеров (НИЦ ТЛ – Москва) и в компании American Photonics (США), составили - (0.07-0.1)%, что находится на уровне лучших результатов материала II-IV Corp.



Ростовая сторона



Подложечная сторона

Рисунок 6.

Примеры структуры поверхности образцов CVD-ZnSe

Порог пробоя.

В получаемых нами образцах ZnSe пробой происходит на входной поверхности. При специальной полировке поверхности порог пробоя образцов ZnSe составляет для импульсного ТЕА CO₂ лазера ($t_{\text{имп.}} = 100 \text{ нс}$) величину более 5 Дж/см². Для непрерывного излучения (cw)- порог пробоя более 50 кВт/см².

Получаемый в настоящее время материал по своим качественным показателям позволяет изготавливать из него элементы силовой оптики в т.ч. и для промышленных CO₂ лазеров. Производимые в настоящее время элементы испытаны для лазеров с мощностью 6 кВт.

2. Габаритные характеристики

Используемое оборудование и технологии в настоящий момент позволяют получать полированные изделия, в том числе и с просветляющим до 99% покрытием, со следующими максимальными габаритами (рис. 7):

- пластины любой формы и конфигурации с наибольшей диагональю до 500 мм и толщиной до (25-30) мм,
- призмы различной конфигурации,
- окна диаметром до 300 мм,
- обтекатели диаметром до 300 мм,
- линзы сферические диаметром до 300 мм,
- линзы асферические диаметром до 140 мм,
- защитные колпаки и обтекатели диаметром до 270 мм.

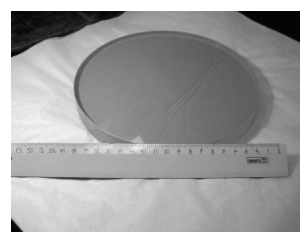
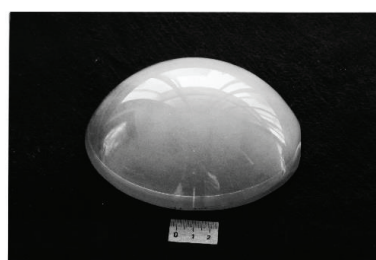
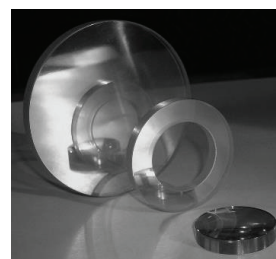
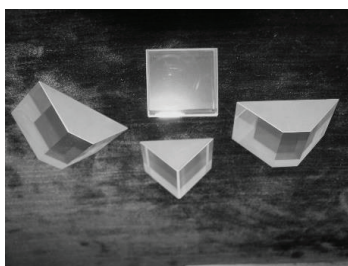


Рисунок 7.

Примеры оптических элементов из CVD-ZnSe

Указанные выше характеристики производимого селенида цинка и изделий из него позволяют использовать его в изготовлении мультиспектральных оптических систем большой апертуры и высокой разрешающей способности, востребованных во многих областях деятельности, включая космическую и оборонную промышленность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время материал, получаемый и обрабатываемый на новом производстве, поставляется и используется в опытном и серийном производстве многих НИИ и промышленных предприятий, включая ВПК.

Кроме того, на мировом и внутреннем Российском рынке работает множество предприятий, разрабатывающих оптические системы, в т. ч. для силовых лазеров и специального назначения. Новые качественные характеристики, получаемого нами материала и изделий на их основе, открывают новые возможности по созданию мультиспектральных широко-апертурных оптико-электронных приборов. Компания R'AIN Group готова использовать весь имеющийся у нее потенциал и навыки для удовлетворения современных и перспективных требований разработчиков, предъявляемых к используемым в них элементам на основе CVD селенида цинка.

Список литературы:

1. *Девярых Г.Г., Гаврищук Е.М., Крупкин П.Л.* Моделирование процесса химического осаждения селенида цинка из газовой фазы в проточном

реакторе. // *Высокочистые вещества.* 1988. № 5. С. 60-69.

2. *Девярых Г.Г., Гаврищук Е.М., Даданов А.Ю.* Исследование кинетики химического осаждения селенида цинка из газовой фазы в горизонтальным проточном реакторе. // *Высокочистые вещества.* 1990. № 2. С. 174-179.

3. *Гаврищук Е.М., Яшина Э.В.* О механизме роста сульфида цинка из газовой фазы. // *Высокочистые вещества.* 1994. №5. С. 36-39.

4. *Гаврищук Е.М.* Поликристаллический селенид цинка для ИК оптики. // *Неорганические материалы.* 2003. Т.39. №9. С. 1031 - 1049.

5. *Гаврищук Е.М., Яшина Э.В.* Оптические элементы из сульфида цинка и селенида цинка для инфракрасной техники. // *Оптический журнал.* 2004. Т.71. № 12. С. 24 –31.

6. *Гаврищук Е.М., Потелов В.В., Сенник Б.Н., Тимофеев О.В.* Влияние условий полирования на качество обработки оптических поверхностей элементов из селенида цинка для изделий, работающих в ИК-диапазоне. // *Прикладная физика.* 2005, №5, С. 107-111.

7. *Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Тимофеев О.В., Кушир С.Р., Радбиль Б.А.* Исследование процесса полирования поликристаллического селенида цинка с использованием полировальных смол на основе канифоли. // *Оптический журнал.* 2008. Т. 75. №9. С.83-89.

8. *Гаврищук Е.М., Вилкова Е.Ю., Колесников А.Н., Тимофеев О.В.* Компьютерная методика оценки качества полированных поверхностей поликристаллических халькогенидов цинка. // *Прикладная физика.* 2009. №2. С.115-120.

ИНФОРМАЦИЯ

ВЫДАЮЩИЙСЯ ДЕЯТЕЛЬ ОПТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



*Корницкий
Игорь Петрович*

Корницкий Игорь Петрович родился 3 марта 1932 г. в городе Киеве. После окончания Киевского Политехнического института в течение 22 лет работал на Киевском заводе «Арсенал» Министерства оборонной промышленности СССР, где прошел путь от мастера до технического директора - первого заместителя генерального директора завода. За время работы при личном участии Корницкого И.П. были внедрены прогрессивные технологические процессы, имеющие отраслевое значение, в том числе впервые для обработки оптики был использован алмазный инструмент.

Возглавив в середине семидесятых годов оптическую отрасль оборонной промышленности СССР, Игорь Петрович Корницкий ярко проявил качества талантливого организатора и руководителя государственного масштаба.

Под его руководством оптическая отрасль получила новый импульс в своем развитии, став еще более наукоемкой и высокотехнологичной. Родились новые научные направления, расширились существующие, появились новые современные производственные мощности.

Высокоточные системы прицеливания для ракетных комплексов всех типов и видов базирования, оптико-электронные системы для бронетанковой техники и авиации, оптико-электронные приборы для систем управления полетом и навигации космических аппаратов, специальная аппаратура для съемки и наблюдения из космоса, комплекс аппаратуры для контроля околоземного космического пространства, лазерная техника различного типа и назначения, а также гидрооптическая аппаратура нового класса для оснащения подводных лодок - вот только неполный перечень научно-технических направлений, развитие которых осуществлялось под непосредственным руководством И.П.Корницкого.

Существенный вклад он внес в развитие производства и улучшения качества широкой гаммы гражданских оптических изделий и товаров народного потребления, включая фотоаппаратуру, бинокли, приборы для здравоохранения.

Под руководством И.П.Корницкого в кратчайшие сроки были построены,

оснащены прогрессивным оборудованием, новейшими технологиями, высокопрофессиональным персоналом и получили свое развитие новые предприятия, такие как Вологодский, Ростовский и Салаватский оптико-механические заводы, Пензенский завод точного приборостроения, Рогачевский завод «Диапроектор», Валдайский завод «Юпитер», Феодосийский оптический завод, заводы «Вега», «Алмаз», «Прогресс», заводы в Умани и Нежине, заводы «Кварц» в Черновцах, «Фотоприбор» в Черкасах, «Зенит» в Вилейке, «Диапроектор» в Рогачеве, «Свет» в Жлобине, «Оптик» в Лиде. Кроме того, велась модернизация и расширялись производства на Красногорском механическом и Новосибирском приборостроительном заводах, в Белорусском оптико-механическом объединении, Киевском «Заводе Арсенал» и других предприятиях.

Важным этапом в его деятельности явилось становление оптической промышленности в Индии, включая строительство оптических заводов и организацию выпуска военной техники.

Успеху отрасли во многом способствовало умение И.П.Корницкого подобрать, правильно расставить и сплотить вокруг себя руководящие кадры оптической отрасли.

После ликвидации Министерства оборонной промышленности СССР Корницкий И.П. организовал и успешно в течение многих лет руководил ОАО «Оптическая техника и технология».

Достижения И.П.Корницкого отмечены высокими государственными наградами и званиями.

Игорь Петрович является лауреатом Ленинской и Государственной премий. Награжден орденами Ленина, Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, За заслуги перед Отечеством IV степени, пятью медалями. Ему присвоено звание «Заслуженный машиностроитель Российской Федерации». Является академиком Общественной научно-технической академии «Контенант», доктором наук.

Уважаемый Сергей Александрович!

*Коллектив Публичного акционерного общества
«Красногорский завод им. С.А.Зверева»,
Общественная научно-техническая академия «Контенант»
сердечно поздравляют Вас со знаменательной датой*

Семидесятилетием со дня рождения



*Пелих
Сергей Александрович*

Верный своему профессиональному долгу, ясно видящий роль и значение современной экономической науки и технического прогресса на протяжении всей своей жизни, Вы тратите много сил, знаний все свое умение и горячую убежденность на развитие экономической науки в интересах Республики Беларусь и Российской Федерации.

Свой большой путь в производство и науку Вы начали в 1964 году после окончания Днепропетровского механического техникума и получили направление на завод «Красмаш», закончили Красноярский политехнический институт и трудились на заводах «Красмаш» и Дивногорском заводе низковольтной аппаратуры.

В 1978 году Вы были переведены заместителем директора по производству Сморгонского завода оптического станкостроения, а в 1985 году назначены генеральным директором.

В 1983 году Вы окончили Институт народного хозяйства им. В.В.Куйбышева и в 1987 году защитили кандидатскую диссертацию на тему: «Совершенствование оперативно-производственного планирования».

В 1993 году Вы защитили в МГУ им. Ломоносова докторскую диссертацию на тему: «Концепция социально-экономического развития коллектива».

С 1995 года Вы работали на кафедре банковского дела и менеджмента в БГЭУ.

С 2003 года – заведующий кафедрой государственного регулирования экономики Академии управления при Президенте Республик Беларусь.

С 2007 – профессор кафедры экономики предприятий.

В 1991 году Вы удостоены почетного звания «Заслуженный работник промышленности Беларуси».

Огромный вклад Вы внесли в создание и развитие Международной академии «Контенант», тем самым всесторонне консолидировали деловые и дружеские связи ведущих оптических предприятий и организаций, в 1994 году Вы стали первым президентом Международной академии «Контенант».

В 1994-1998 гг. – генеральный директор Гуманитарного фонда СНГ «Содружество». Вы являетесь автором около 250 печатных работ и 19 монографий.

Ваши научные труды изданы по проблемам развития социальной сферы, использования операционно-экономических механизмов управления и повышения эффективности производственного процесса, экономики управления регионом государственному регулированию экономикой.

На протяжении длительного времени Вы всесторонне укрепляли деловые и дружеские связи ведущих предприятий оптической отрасли Республики Беларусь и нашего предприятия.

Уважаемый Сергей Александрович, в этот знаменательный день от всей души желаем Вам крепкого здоровья, семейного счастья и благополучия, дальнейших успехов в научной деятельности на благо Республики Беларусь и Российской Федерации.

ОСНОВЫ МОНЕТАРНОЙ ПОЛИТИКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

ПЕЛИХ С.А., доктор экономических наук, профессор

Академия управления при Президенте Республики Беларусь

Опыт стран успешно и быстро создавших стабильную экономическую систему показывает, что в основе создания такой системы лежит «монетарная сфера».

Вальтер Ойкен, теоретик и идеолог немецкого экономического «чуда», в своем труде «Основы экономической политики» монетарной политике посвятил I главу и обосновал ее фундаментальное значение в экономике.

Шведская экономика свое устойчивое, поступательное развитие в 30-50 гг. XX столетия начала под влиянием работ Густава Касселя, посвященных валютной политике и обоснованию определения курса валюты по паритету покупательной способности (ППС). ППС до сих пор лежит в основе определения объективного курса валют в деятельности Международного валютного фонда, Мирового банка и других международных организаций.

Стремительное развитие стран Юго-Восточной Азии началось в 50 гг. XX века в Японии. И опять в основу создания этой экономики были положены монетарные факторы. Например, определение курса валюта осуществлялось по ППС, свободная продажа валюты была введена только в середине 70 гг. XX века, что в сочетании с введением «критичного импорта» позволило рационально использовать валюту только на приобретение новейших технологий и заводов «под ключ». Была создана система приоритетов при осуществлении структурных реформ и промышленной политики, которая позволила концентрировать денежные ресурсы на важнейших направлениях экономики. При этом формировались мощные транснациональные корпорации (кейрецу) с обязательным включением в их состав банковских учреждений страны, которые по доходности стояли на уровне промышленных предприятий.

После Японии идентичную экономическую политику применили все остальные азиатские «тигры», что быстро вывело их в ряды успешно развивающихся стран. Китай тоже не является исключением, чем и объясняются его выдающиеся достижения за последние 25 лет.

Опыт Республики Беларусь, как и всех остальных постсоветских стран, показывает, что мы не уделяем достаточного внимания монетарной сфере и это серьезно сдерживает наше поступательное развитие.

Прежде всего надо обратить внимание на низкую монетизацию экономики Республики Беларусь. Коэффициент монетизации в Республике Беларусь колеблется в пределах 0,15 – 0,25, при необходимом 1,0. Т.е. на 100 млрд. долл. США валового внутреннего продукта у нас приходится белорусских рублей на 25 млрд. долл. США в эквиваленте. По этому показателю мы находимся на 137 месте в мире между Танзанией и Замбией.

Такой низкий коэффициент объясняется рядом факторов, важнейшим из которых является низкая величина сбережений населения (два месячных дохода) и тем обстоятельством, что наши основные материальные ресурсы (земля и недвижимость) не участвуют в экономической деятельности как носители капитала. Взамен отечественным денежным знакам мы вынуждены применять валюту в сумме около 50 млрд. долл. США, что очень накладно и не позволяет проводить самостоятельную денежно-кредитную политику, создавать устойчивую макроэкономическую среду. Выход видится в скорейшем внедрении ипотеки, что позволит ввести в финансовый оборот землю и недвижимость.

Очень серьезно и негативно влияет на предсказуемую экономическую деятельность постоянная девальвация белорусского рубля. Удивительно то, что это явление имеет своих сторонников, которые находят его позитивно влияющим на экономику, на увеличение экспортных возможностей предприятий. Недавно на эту тему была успешно защищена кандидатская диссертация в БГЭУ.

Выходит, что постоянное занижение цен ниже мировых является благом. Неудивительно, что наш ВВП Международный валютный фонд оценивает в 147 млрд. долл. США в 2014 г., а национальная статистика в 66 млрд. долл. США, а этот показатель является важнейшим в определении инвестиционной привлекательности страны.

Выход здесь один и он известен – определять курс рубля по ППС, как это делают все страны. Для этого надо в два раза поднять цены до мирового уровня и в два раза повысить доходы населения и реального сектора. Такое действие было сделано при воссоединении ГДР и ФРГ, что позволило быстро интегрировать экономики двух стран.

Много действий и пожеланий делается для того, чтобы рационально расходовать валютные поступления в экономику. Но пока это мало что дает, так как по оценкам экспертов Беларусь 8-10 млрд. долл. США тратит на приобретение товаров и услуг, которые с успехом могла бы производить сама. Например, мы ежегодно

закупаем 25 млн. долл. США яблок, которые с избытком производятся в стране.

В то же самое время, у нас в Бресте есть электроламповый завод, которому, чтобы производить энергосберегающие лампы, надо было за 25 млн. долл. США купить соответствующую линию «под ключ». Таких денег до сих пор в стране не нашлось. Так не проще ли и гораздо эффективнее правительству создать список товаров и услуг, на которые не рекомендовать банкам давать валюту на их покупку, а параллельно создать инновационный фонд, который позволил бы покупать нужные патенты, изобретения, заводы «под ключ».

При этом надо полностью прекратить практику свободной продажи валюты резидентам и нерезидентам, кроме инвесторов-нерезидентов для вывоза прибыли со своих инвестиций. Оппоненты мне говорят, что, во-первых, это противоречит принципам ВТО, а во-вторых, это обеднит ассортимент наших потребителей. Китай проводит только внешнюю конвертацию уже 25 лет, последние десять являясь членом ВТО.

На второе резонное замечание можно ответить таким образом: да, определенные неудобства будут, но у нас есть в стране хорошая практика по продаже элитного алкоголя. Т.е. продукты редких, экзотических свойств можно закупать, но при этом через входную пошлину 100 – 300 %.

После этого мы сразу начнем строить наукоемкую промышленную политику, имея до 10 млрд. долл. США государственных инвестиций, растрачиваемых сейчас на некритичный импорт. Следует перестроить деятельность банковской системы страны по рациированию внутренних инвестиций в достаточном количестве. Это примерно 100 млрд. долл. США в год, по доступной цене (1-2% годовых). Это в 3 раза больше, чем вкладывается сейчас. Для этого надо отказаться от политики профицита бюджета, а организовать внутреннее и внешнее заимствование в размере 60 % от ВВП как, например, это делают страны ЕС и США.

Банковская система должна перестроить свою деятельность и качественно, что заключается в том, что прибыльность ее является не важной для реального сектора. Наоборот, важной является низкая цена услуг этого сектора, как любой инфраструктурной сферы, например, почты, связи, транспорта. По этим правилам работают банки Юго-Восточной Азии, банки мусульманских стран.

Все эти меры помогут погасить инфляцию до 1,5 – 2 % годовых, а значит позволят начать создавать систему институциональных инвесторов и прежде всего пенсионные фонды накопительного типа, страховые фонды. Это дает возможность генерировать «длинные деньги» – по срокам до 30 лет под 0,5 – 1 % для осуществления серьезных структурных изменений в экономике. Это, например, создание современной логистической системы, вложения в альтернативную энергетику, «зеленую» экономику и т.д.

Влияние руководителей банковской системы и правительства на эти проблемы и быстрее их решение позволит Республике Беларусь и дальше устойчиво и поступательно развивать свою экономику.

ПАМЯТИ ГЕНЕРАЛЬНОГО КОНСТРУКТОРА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВИКТОРА ВАСИЛЬЕВИЧА НЕКРАСОВА (1931-1995 гг.)



*Некрасов
Виктор Васильевич*

4 февраля 2016 года исполняется 85 лет со дня рождения Виктора Васильевича Некрасова, около 20 лет, в период с 1976 по 1995 годы, являвшегося начальником ЦКБ, лауреата Государственных (1971 и 1981 годы) и Ленинской (1988 год) премий, доктора технических наук, профессора.

Многие заводчане и сейчас, спустя 20 лет после его кончины, хорошо помнят Виктора Васильевича по совместной работе на предприятии. Хорошо известно, что время многое расставляет по своим местам: прошедшие после ухода В.В. Некрасова годы подчеркнули величие и значимость этого человека – талантливого конструктора и руководителя, ученого и организатора.

Нужно сказать, что ЦКБ и НТЦ всегда являлись предметом особой заботы руководителей предприятия, учитывая ту важность и ответственность, которую занимает это подразделение в создании новых изделий. Выпускник МВТУ им. Н.Э. Баумана 1957 года, Виктор Васильевич последовательно прошел трудовой путь от молодого специалиста, инженера-конструктора, начальника КБ, начальника отдела, заместителя начальника ЦКБ - начальника тематического отделения до начальника крупнейшего в оптико-механической отрасли ЦКБ, **генерального конструктора страны по бортовым фотографическим и оптико-электронным системам.**

Под его руководством ЦКБ перешло от создания отдельных приборов к созданию оптико-механических систем и комплексов, выделяющихся комплексным подходом к решению сложных задач при разработке наукоемких изделий, к которым по праву можно отнести аппараты: «Фтор-2РЗ» и «Фтор-6» (1971 год), панорамные аэрофотоаппараты для съемки земной поверхности с малых и предельно малых высот (1975 год), аппаратуру «Жемчуг-18» с первым апохроматическим длиннофокусным объективом «Кентавр», оптико-электронный комплекс «Топаз» и многие другие.

Коллеги В.В. Некрасова всегда отмечали глубокие теоретические знания, целеустремленность и организованность, которые способствовали становлению его как крупного руководителя и ученого, возглавлявшего НИР и ОКР по всем основным тематическим направлениям ЦКБ. Личная творческая деятельность В.В. Некрасова также была очень плодотворной и являлась примером для многих коллег.

Виктор Васильевич имел 63 изобретения, ему было присвоено почетное звание «Заслуженный изобретатель РСФСР», он автор и соавтор около 200 печатных работ и докладов, доктор технических наук, профессор одной из кафедр МВТУ им. Н.Э. Баумана.

Успешному руководству таким многопрофильным подразделением завода и отрасли, как ЦКБ, во многом способствовали высокие личные и человеческие качества Виктора Васильевича - техническая эрудиция, ответственность за порученное дело, стратегическое мышление, которое всегда обеспечивали нацеленность разработанных коллективов на решение поставленных перед предприятием и отраслью задач.

Этот период работы завода характеризуется созданием ряда уникальных систем по всем тематическим направлениям ЦКБ, таким как «Опал-1» и «Опал-2», «Бирюза», «Родонит», «Топаз», «Жемчуг-18», аэрофотоаппараты «Созвездие», «Лимонад», комплекс контроля космического пространства, СОУ 1А38, СОУ 1А45, первые отечественные тепловизоры «Агава», «Агава-2», «Ноктюрн».

В.В. Некрасовым была создана команда руководителей и единомышленников: И.С. Мерлушкин, В.И. Осипов, Е.Н. Герасимов, Ю.В. Рябушкин, Ю.С. Чапыгин, В.В. Павлин, А.К. Меньков. Под его руководством выросло много талантливых разработчиков: лауреаты Ленинской премии А.А. Сучков и В.Д. Кудинов, лауреаты Государственной премии А.И. Абрамов, А.С. Тельчак, В.Ф. Турукин, В.В. Герасименко, нынешней директор НТЦ Г.А. Донцов; руководители и главные конструкторы тематических направлений НТЦ: А.Ю. Ляхов, С.А. Архипов, В.И. Колинко, которые и ныне продолжают активную творческую деятельность по созданию современных наукоемких оптико-электронных комплексов и систем.

Следует особо подчеркнуть ту большую роль и поддержку, которые оказывали проведению НИР и ОКР руководители предприятия: В.Г. Трифонов, А.И. Гоев, В.П. Жигулич, А.П. Тарасов в изготовлении приборов, проведении технического перевооружения производства, решении сложных организационно-технических и финансовых проблем.

Конечно, велики роль и значимость В.В. Некрасова в развитии научно-технического центра и завода, отечественного оптического приборостроения, но главное – это память о нем в сердцах и делах коллег и соратников, ветеранов предприятия.

Майков Б.П., председатель совета ветеранов ПАО КМЗ